كِيت يايتس

KIT YATES

رياضيّات الحياة والموت

THE MATHS OF LIFE AND DEATH



الدار العربية للعلوم ناشرون
Arab Scientific Publishers, Inc.

رياضيّات الحياة والموت

THE MATHS OF LIFE AND DEATH

رياضيّات الحياة والموت

THE MATHS OF LIFE AND DEATH

كِيت يايتس

KIT YATES

ترجمة

زينة إدريس

مراجعة وتحرير

مركز التعريب والبرمجة



يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الإنكليزي

The Maths of Life and Death

حقوق الترجمة العربية مرخّص بها قانونياً من الناشر

Quercus Editions Ltd, Carmelite House, 50 Victoria Embankment, London EC4Y 0DZ.

بمقتضى الاتفاق الخطي الموقّع بينه وبين الدار العربية للعلوم ناشرون، ش.م.ل.

الطبعة الأولى: كانون الثاني/يناير 2020 م - 1441 هـ

ردمك 978-614-02-3819-0



www.aspbooks.com
asparabic

عين التينة، شارع المفتي توفيق خالد، بناية الريم
هاتف: 786233 – 785108 – 785107 (1–961+)
ص.ب: 13–5574 شوران – بيروت 2050–1102 – لبنان
فاكس: 786230 (1–961+) – البريد الإلكتروني: asp@asp.com.lb
الموقع على شبكة الإنترنت: http://www.asp.com.lb

تصميم الغلاف: **علي القهوجي**

التنضيد وفرز الألوان: **أبـجـد غرافيكس**، بيروت - هـاتف 785107 (1-961+)

الطباعـة: **مطـابع الـدار العربية للعلـوم**، بيروت - هاتف 786233 (1-961+)

المحْتويَات

إلى والديّ وتيم ونانسي وماري
الذين علّموني القراءة،

وإلى شقيقتي لوسي
التي علّمتني الكتابة.

مقدّمة

كلّ شيء تقريباً

يحبّ ابني البالغ من العمر أربع سنوات اللعب في الحديقة. ويقوم نشاطه المفضّل على نبش التراب واستكشاف الزواحف الصغيرة، لا سيّما الحلازين. وإذا كانت هذه الأخيرة تتمتّع بالصبر الكافي، فإنّها تغادر أمان قوقعتها بحذر بعد الصدمة الأوّلية، وتبدأ بالانزلاق على يديه الصغيرتين، مخلّفة خطوطاً لزجة وراءها. في النهاية، عندما يتعب منها، يلقيها، بقسوة إلى حدّ ما، في كومة السماد أو على الحطب المكدّس خلف السقيفة.

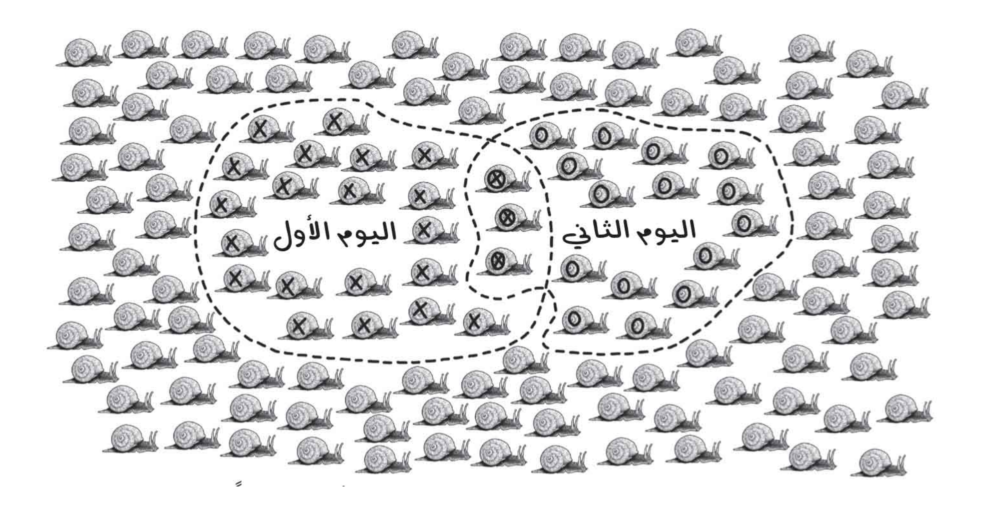
في أواخر شهر سبتمبر الماضي، وبعد جلسة مطوّلة انشغل فيها بإخراج خمس أو ستّ حلازين كبيرة والتخلّص منها، أتى إليّ بينما كنت أقطّع الحطب وسألني: «أبي، كم عدد الحلازين التي تعيش في حديقتنا؟». كان سؤالاً بسيطاً في الظاهر، لكنّني لا أملك جواباً عليه. فمن المحتمل وجود مائة، أو ربّما ألف. وبصراحة، لن يفهم الفرق بينهما. مع ذلك، أثار سؤاله فضولي. كيف يمكننا معرفة ذلك معاً؟

قرّرنا إجراء تجربة. في عطلة الأسبوع التالية، خرجنا صباح يوم السبت لجمع الحلازين. وبعد عشر دقائق، جمعنا 23 منها. فأخرجتُ قلماً من جيبي الخلفي وشرعت بوضع علامة على قوقعة كلّ منها. وما إن انتهيت، حتّى قلبنا الدلو رأساً على عقب، وأطلقنا الحلازين في الحديقة مجدّداً.

بعد أسبوع، قمنا بجولة أخرى. هذه المرّة، أثمر بحثنا الذي امتدّ لعشر دقائق عن 18 حلزوناً فقط. وعندما تفحّصناها عن كثب، وجدنا أنّ ثلاثة منها تحمل علامة على قوقعتها، في حين أنّ الخمس عشرة الأخرى نظيفة. وكانت هذه المعلومات كافية لإجراء العملية الحسابية.

الفكرة كالتالي: يشكّل عدد الحلازين التي جمعناها في اليوم الأوّل، أي 23، نسبة معيّنة من إجمالي عدد حلازين الحديقة الذي نريد معرفته بشكل تقريبي. وإذا استطعنا تحديد هذه النسبة، فإنّه بإمكاننا مضاعفة عدد الحلازين التي وجدناها لمعرفة إجمالي عددها في الحديقة. لذلك نستخدم عيّنة ثانية (تلك التي جمعناها يوم السبت التالي). يجب أن تمثّل نسبة الحلازين الموسومة في هذه العيّنة،

أي 3/ 18، نسبةَ الحلازين الموسومة في الحديقة ككلّ. عندما نبسّط هذه النسبة، نجد أنّ القواقع الموسومة تشكّل واحدة من بين كل ستّة من حلازين الحديقة بشكل عامّ (يمكن رؤية ذلك في الشكل 1). بالتالي، نضاعف عدد الحلازين الموسومة التي تمّ جمعها في اليوم الأوّل، أي 23، بعامل ستّة للتوصّل إلى تقدير لإجمالي عدد الحلازين في الحديقة، وهو 138.



الشكل 1: يجب أن تكون نسبة (3:18) من عدد الحلازين التي جُمعت ثانيةً (التي تحمل العلامة ⊗) إلى العدد الإجمالي الذي تمّ جمعه في اليوم الثاني (الذي يحمل العلامة O) هي نفس نسبة (23:138) العدد الذي جُمع في اليوم الأوّل (ويحمل علامة x) إلى إجمالي عدد الحلازين في الحديقة (الموسومة وغير الموسومة).

بعد انتهائي من هذا الحساب الذهني، التفتُّ إلى ابني، الذي كان «يرعى» القواقع التي جمعناها. وعندما أخبرته أنّ نحو 138 حلزونة تعيش في حديقتنا، قال وهو ينظر إلى بقايا القوقعة التي لا تزال عالقة على أصابعه: «بابا، لقد ماتت». لنقل إذاً إنّ عددها 137.

تأتي هذه الطريقة الرياضية البسيطة، المعروفة باسم الزيارات المتعدّدة، من علم البيئة، وتستخدم لتقدير أعداد الحيوانات. بإمكانك استخدام هذه التقنيّة بنفسك من خلال أخذ عيّنتَين مستقلّتَين ومقارنة التداخل بينهما. ربّما أردت تقدير عدد تذاكر السحب التي تمّ بيعها في المعرض المحلّي، أو تقدير عدد حضور مباراة لكرة القدم باستخدام أرومة التذاكر بدلاً من الاضطرار إلى عدّ الحضور فرداً فرداً.

تُستخدم طريقة الزيارات المتعدّدة في المشاريع العلمية الجادّة أيضاً. إذ من شأنها، على سبيل المثال، أن تقدّم معلومات حيوية عن الأعداد المتقلّبة للأنواع المهدّدة بالانقراض. فمن خلال توفير تقدير لعدد الأسماك في إحدى البحيرات[1]، قد يسمح ذلك لمصائد الأسماك بتحديد عدد التصاريح

التي يجب إصدارها. وقد بلغت هذه التقنيّة من الفاعليّة أن تطوّر استخدامها ليتجاوز علم البيئة ويقدّم تقديرات دقيقة لكلّ شيء، من أعداد مدمني المخدّرات بين السكّان[2]، إلى عدد قتلى الحرب في كوسوفو[3]. هذه هي القوّة البراغماتية التي يمكن للأفكار الرياضية البسيطة أن تنتجها. وتلك هي أنواع المفاهيم التي سوف نستكشفها من خلال هذا الكتاب، والتي أستخدمها بشكل روتيني في عملي اليومي كبيولوجي رياضي.

* * *

عندما أُخبر الناس أنّني عالم أحياء رياضي، يجيبون عادة بإيماءة مهذّبة مصحوبة بصمت محرج، كما لو كنت على وشك اختبار ما يذكرونه من المعادلة التربيعية أو نظرية فيثاغورس. والمسألة لا تقتصر على مجرّد الإحباط، بل تجدهم يناضلون لفهم كيفيّة ارتباط موضوع مثل الرياضيّات، الذي يرونه مجرّداً ونقياً وأثيرياً، بمجال مثل علم الأحياء، الذي يُعتقد عادةً أنّه عملي وفوضوي وبراغماتي. وغالباً ما نصادف هذا الانفصال المصطنع في المدرسة أوّلاً. هكذا، إذا كنت تحبّ العلوم، ولكنّك غير مولع بالجبر، فلا شكّ أنّه سيتمّ دفعك إلى فرع علوم الحياة. أمّا إذا كنت مثلي، تستمتع بالعلوم لكن ليس إلى درجة تشريح الحيوانات الميتة (أغمي عليّ في إحدى المرّات، في بداية فصل التشريح، عندما دخلت المختبر ورأيت رأس سمكة على طاولتي) فسيتمّ توجيهك نحو العلوم الفيزيائية. أمّا أن يلتقي الفرعان، فهذا محال.

هذا ما حدث لي. تركتُ علم الأحياء في الثانوية العامّة، وأخذت موادّ تأسيسية في الرياضيّات والفيزياء والكيمياء. وعندما دخلت الجامعة، اضطررت إلى ضبط الموادّ الدراسية أكثر، وشعرت بالحزن لاضطراري لترك علم الأحياء نهائيّاً، لا سيّما وأنّه مجال يمتاز بقدرة لا تصدّق برأيي على تغيير حياة البشر للأفضل. كنت شديد الحماسة لفرصة الانغماس في عالم الرياضيّات، لكنّني شعرت بشيء من القلق لتخصّصي في مجال يشتمل على ما يبدو على عدد قليل جدّاً من التطبيقات العملية. غير أنّني كنت مخطئاً للغاية.

بينما كنت أتدرّب على الرياضيّات البحتة التي تعلّمناها في الجامعة، وأحفظ دليل نظريّة القيمة المتوسّطة أو تعريف الفضاء المتّجهي، أمضيت كلّ وقتي على دروس الرياضيّات التطبيقية. استمعت إلى المحاضرين وهم يشرحون الرياضيّات التي يستخدمها المهندسون لبناء الجسور حتى لا تهتزّ بفعل الرنين الميكانيكي وتنهار أمام الرياح، أو لتصميم الأجنحة التي تضمن عدم سقوط الطائرات من السماء. تعلّمت ميكانيكا الكمّ التي يعتمد عليها علماء الفيزياء لفهم الظواهر الغريبة

التي تجري على المستويات دون الذرّية، ونظريّةَ النسبيّة الخاصّة التي تستكشف العواقب الغريبة لثبات سرعة الضوء. أخذتُ موادّ تشرح الطرق التي نستخدم بها الرياضيّات في الكيمياء، والمالية، والاقتصاد. كما قرأت عن دور الرياضيّات في تعزيز أداء الرياضيين، وفي إنتاج صور للسينما بواسطة الكمبيوتر لصنع مَشاهد لا وجود لها في عالم الواقع. باختصار، تعلّمت أنّه بالإمكان استعمال الرياضيّات لوصف كلّ شيء تقريباً.

في السنة الثالثة من دراستي، أخذت مادّة في علم الأحياء الرياضي، وكان ذلك من حسن حظّي. كان المُحاضر يدعى فيليب مايني، وهو أستاذ من إيرلندا الشمالية في العقد الرابع من عمره. لم يكن فقط أستاذاً بارزاً في مجاله (سيتمّ انتخابه لاحقاً كزميل في الجمعية الملكية)، بل كان يحبّ مجاله بوضوح، واستطاع نقل حماسته للطلّاب خلال المحاضرات.

لم يكن فيليب مجرّد عالم أحياء رياضي، بل اكتشفت على يديه أنّ علماء الرياضيّات هم بشر يتمتّعون بالمشاعر، وليسوا آليين أحاديّي البعد كما يتمّ تصويرهم في الغالب. فكما قال عالم الاحتمالات الهنغاري، ألفرد ريني، ذات مرّة، إنّ عالِم الرياضيّات هو أكثر من مجرّد «آلة لتحويل القهوة إلى نظريات رياضيّة». بينما كنت جالساً في مكتب فيليب بانتظار بدء المقابلة من أجل درجة الدكتوراه، رأيت أُطُراً معلّقة على الجدران تحتوي على رسائل الرفض العديدة التي تلقّاها من أندية الدوري الإنكليزي الممتاز التي تقدّم إليها على سبيل المزاح لشغل مناصب إدارية شاغرة. وانتهى بنا الأمر بالتحدّث عن كرة القدم أكثر من الحديث عن الرياضيّات.

في هذه المرحلة الحاسمة من دراستي الأكاديمية، ساعدني فيليب على التعرّف بشكل كامل على علم الأحياء. فخلال سنوات الدكتوراه تحت إشرافه، عملت على كلّ شيء، بدءاً من فهم طريقة احتشاد الجراد وكيفيّة إيقافه، إلى توقّع الرقصة المعقّدة المتمثّلة في تطوّر جنين الثدييات والعواقب المدمّرة لعدم تزامن الخطوات. بنيتُ نماذج تشرح أنماط التصبّغ الجميلة لبيض الطيور، وكتبت خوارزميّات لتتبّع حركة العوالق. كما قمت بمحاكاة الطفيليات التي تتملّص من أجهزتنا المناعية، ونمذجة الطريقة التي تنتشر بها الأمراض الفتّاكة بين السكّان. كان العمل الذي بدأته خلال فترة الدكتوراه بمثابة حجر الأساس لبقيّة مسيرتي المهنية. وما زلت أعمل في هذه المجالات الرائعة في علم الأحياء، وغيره، مع طلّاب الدكتوراه الذين يعملون تحت إشرافي، في منصبي الحالي كأستاذ مشارك (محاضر أوّل) في الرياضيّات التطبيقيّة في جامعة باث.

* * *

بصفتي عالم رياضيّات تطبيقي، أرى الرياضيّات، أوّلاً وقبل كلّ شيء، أداةً عمليّة لفهم عالمنا المعقّد. إذ من شأن النمذجة الرياضية أن توفّر لنا ميزة إيجابية في الحياة اليومية، وليس من الضروري من أجل ذلك أن تشتمل على مئات المعادلات المملّة أو سطور التعليمات البرمجية. فالرياضيّات في الأساس عبارة عن نمط. كلّما نظرتَ إلى العالم، تقوم ببناء نموذجك الخاصّ للأنماط التي تلاحظها. هكذا، عندما ترى شكلاً في الأغصان الكسورية لإحدى الأشجار، أو في التناظر متعدّد الطيّات لندفة الثلج، فإنّك ترى الرياضيّات. وعندما تحرّك قدمك على وقع الموسيقى، أو يتردّد صوتك ويرتدّ الصدى وأنت تغنّي في الحمّام، فإنّك تسمع الرياضيّات. وإذا سدّدت كرة في الشبكة أو التقطتَ كرة كريكيت على مسارها المكافئ، فأنت تمارس الرياضيّات. مع كلّ تجربة جديدة، ومع كلّ جزء من المعلومات الحسّية، يتمّ صقل النماذج التي صنعتَها لبيئتك ويُعاد تشكيلها لتصبح أكثر تفصيلاً وتعقيداً. في الواقع، يعتبر بناء النماذج الرياضية المصمّمة لفهم واقعنا المعقّد أفضلَ طريقة لفهم القواعد التي تحكم العالم من حولنا.

أعتقد أنّ أبسط وأهمّ النماذج تكمن في القصص والتماثلات. لكي يفهم الناس التأثير الخفيّ للرياضيّات، علينا أن نظهر لهم آثاره على حياتهم: من الآثار غير العادية إلى تلك اليومية. فعند النظر من خلال العدسة الصحيحة، يمكننا البدء باكتشاف القواعد الرياضية الخفيّة التي تقوم عليها تجاربنا المشتركة.

تستكشف فصول هذا الكتاب السبعة القصص الحقيقية لأحداث عميقة التأثير أدّى فيها تطبيق الرياضيّات (أو إساءة تطبيقها) دوراً حاسماً: مرضى أُقعدوا بسبب جينات مَعيبة، ورجال أعمال أفلسوا بسبب خوارزميات خاطئة؛ ضحايا أبرياء لإخفاقات العدالة، وضحايا غير مقصودين لمواطن خلل في البرمجيات. سنتابع قصص مستثمرين خسروا ثروات، وآباء خسروا أطفالاً، وكلّ ذلك بسبب سوء فهم رياضي. سنكافح مع معضلات أخلاقية، من المسح الضوئي إلى الحيل الإحصائية، ونبحث قضايا مجتمعية بارزة مثل الاستفتاءات السياسية، والوقاية من الأمراض، والعدالة الجنائية، والذكاء الاصطناعي. وسنرى في هذا الكتاب أنّ للرياضيّات دور عميق أو مهمّ في كلّ هذه الموضوعات وغيرها.

عوضاً عن مجرّد الإشارة إلى المواضع التي قد تظهر فيها الرياضيّات، سأزوّدك بالقواعد والأدوات الرياضية البسيطة المفيدة في الحياة اليومية: من الجلوس في أفضل مقعد في القطار، إلى الحفاظ على هدوئك عند استلام نتيجة اختبار غير متوقّعة من الطبيب. كما سأقترح طرقاً بسيطة لتجنّب ارتكاب الأخطاء العددية، وسنلوّث أيدينا بالحبر ونحن نحلّل الأرقام وراء العناوين الرئيسة.

سنعمل عن كثب أيضاً على الرياضيّات الكامنة وراء علم الوراثة الاستهلاكي، ونراقب الرياضيّات أثناء عملها ونحن نسلّط الضوء على الخطوات الممكن اتّخاذها لوقف انتشار الأمراض الفتّاكة.

لا شكّ أنّك فهمت الآن أنّ هذا الكتاب ليس كتاب رياضيّات، ولا هو كتاب لعلماء الرياضيّات. فأنت لن تجد معادلة واحدة في صفحاته. ذلك أنّ الهدف منه ليس مراجعة دروس الرياضيّات التي سقطت من ذاكرتنا منذ سنوات عديدة، بل على العكس تماماً. بالتالي، إذا سبق أن شعرت أنّك لا تستطيع المشاركة في الرياضيّات أو أنّك غير بارع فيها، فإنّ هذا الكتاب سيحرّرك من ذلك الشعور.

أنا أعتقد حقّاً أنّ الرياضيّات للجميع، وأنّه بإمكاننا جميعاً تقدير الرياضيّات الجميلة الكامنة داخل الظواهر المعقّدة التي نصادفها يوميّاً. هكذا سنرى في الفصول التالية أنّ الرياضيّات هي الإنذارات الكاذبة التي تلعب بأذهاننا، والثقة الزائفة التي تساعدنا على النوم ليلاً. إنّها القصص التي تمطرنا بها وسائل التواصل الاجتماعي والتعليقات المصوّرة (memes) التي تنتشر عبرها. الرياضيّات هي الثغرات الموجودة في القانون كما أنّها الإبرة التي تغلقها؛ التكنولوجيا التي تنقذ الأرواح والأخطاء التي تعرّضها للخطر. إنّها اندلاع مرض فتّاك واستراتيجيات السيطرة عليه. وهي أفضل أمل لدينا للإجابة على الأسئلة الأساسية حول ألغاز الكون وأسرار نوعنا. تقودنا الرياضيّات إلى مسارات لا تعدّ ولا تحصى في حياتنا، وتنتظر وراء الحجاب، لتحدّق إلينا ونحن نلفظ أنفاسنا الأخيرة.

1
التفكير الأُسّي: استكشاف القوّة الهائلة والحدود الرصينة للسلوك الأسّي

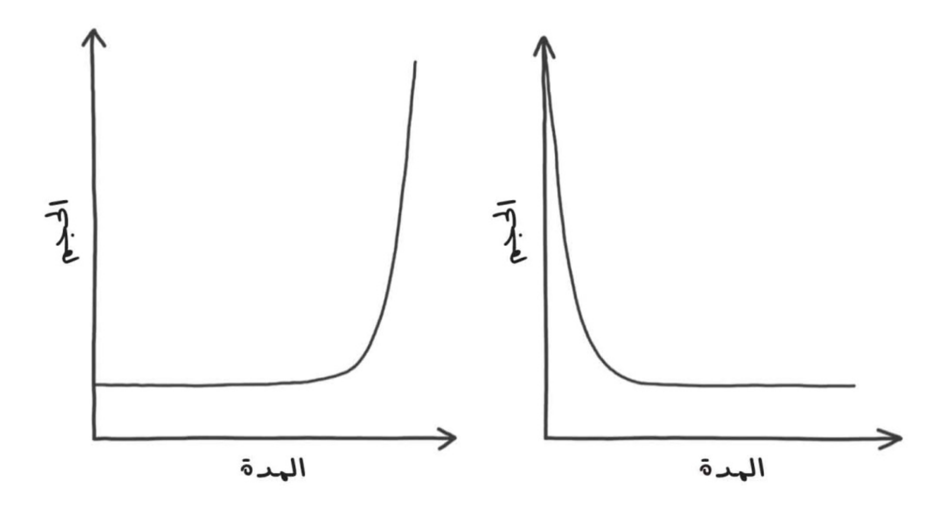
يعمل دارن كاديك مدرّباً لقيادة السيّارات، ويعيش في كالديكوت، وهي بلدة صغيرة تقع جنوب ويلز. في عام 2009، قدّم له صديقه عرضاً مربحاً، يقوم على المساهمة بمبلغ 3,000 جنيه استرليني فقط في مجموعة استثمارية محلّية وتجنيد شخصين آخرَين للقيام بالمثل، ليحصل على عائد قدره 23,000 جنيه استرليني في غضون أسبوعين فقط. في البداية، وجد كاديك العرض غير واقعي، وقاوم الإغراء. لكن في نهاية المطاف، أقنعه صديقه أنّ «لا أحد سيخسر، لأنّ المشروع سيستمرّ بلا توقّف»، فقرّر المجازفة. غير أنّه خسر كلّ شيء، وبعد عشر سنوات، ما زال يعاني من العواقب.

وجد كاديك نفسه عن غير قصد في أسفل مخطّط هرمي لم يستطع «الاستمرار بلا توقّف». بدأ مشروع «العطاء المتبادل» في عام 2008، ثمّ نفَدَ المستثمرون الجدد وانهار في أقلّ من عام، لكن ليس قبل أن يبتلع 21 مليون جنيه استرليني من أكثر من عشرة آلاف مستثمر في المملكة المتّحدة، خسر 90% منهم حصّتهم البالغة 3,000 جنيه استرليني. في الواقع، فإنّ المشاريع الاستثمارية التي تعتمد على قيام المستثمرين بتجنيد عدد من المستثمرين الآخرين من أجل تأمين مدفوعاتهم هي مشاريع محكوم عليها بالفشل. إذ يزداد عدد المستثمرين الجدد المطلوبين في كلّ مستوى بما يتناسب مع عدد الأشخاص في المشروع. وبعد 15 جولة من التجنيد، سيكون ثمّة أكثر من 10,000 شخص في مشروع هرمي من هذا النوع. ومع أنّ هذا العدد يبدو كبيراً، إلّا أنّ تحقيقه تمّ بسهولة في مشروع «العطاء المتبادل». لكن بعد 15 جولة أخرى، سيحتاج واحد من كلّ سبعة أشخاص على هذا الكوكب إلى الاستثمار فيه ليستمرّ. تُعرف ظاهرة النموّ السريع هذه، التي أدّت إلى الافتقار الحتمي إلى مستثمرين جدد وانهيار المشروع في نهاية المطاف، باسم النموّ الأسّي.

لا جدوى من البكاء على الحليب المسكوب

يحدث النموّ الأسّي عندما يزداد الشيء بما يتناسب مع حجمه الحالي. على سبيل المثال، عندما تفتح عبوة الحليب في الصباح، فإنّ خلية واحدة من البكتيريا العقدية البرازية تجد طريقها إلى داخل العبوة قبل أن تعيد إغلاقها. وتعتبر هذه البكتيريا واحدة من الأنواع المسؤولة عن تحمّض وتخثّر الحليب، لكنّ خلية واحدة ليست ربّما بالأمر الخطير[4]. غير أنّ رأيك سيتغيّر حتماً إذا عرفت أنّه من شأن البكتيريا العقدية البرازية في الحليب أن تنقسم لإنتاج خليتين كلّ ساعة[5]. وفي كلّ جيل، يزداد عدد الخلايا بما يتناسب مع العدد الحالي للخلايا، بحيث تنمو أعدادها بشكل أسّي.

يذكّرنا المنحنى الذي يصف كيفيّة ازدياد الكمّية المتنامية أُسّياً بالمنحدر الذي يستخدمه المتزلّجون، سواء بلوح التزلّج أو بالدرّاجة. ففي البداية، يكون تدرّج المنحدر منخفضاً جدّاً، ويكون المنحنى ضئيلاً للغاية، ثمّ يكتسب الارتفاع تدريجيّاً (كما يظهر في المنحنى الأوّل في الشكل 2). بعد ساعتين، نجد أربعة خلايا من البكتيريا في الحليب، تصبح 16 خلية فقط بعد أربع ساعات، الأمر الذي لا يسبّب مشكلة كبيرة. لكن كما هو الحال مع منحدر التزلّج، فإنّ ارتفاع المنحنى الأسّي وانحداره يزدادان بسرعة. فقد تبدو الكمّيات التي تنمو باطّراد بطيئةً في البداية، لكنّ أعدادها سترتفع بسرعة بطريقة تبدو غير متوقّعة. وإذا تركتم الحليب خارجاً لمدّة 48 ساعة، واستمرّت الزيادة الأُسّية للخلايا العقدية البرازية، سيكون عددها قد بلغ نحو ألف تريليون خلية عندما تعودون لصبّ الحليب مجدّداً، وهو عدد كافٍ لتخثير دماء الإنسان، فما بالكم بالحليب. في هذه المرحلة، سيفوق عدد الخلايا عدد سكّان الكوكب، بحيث يوازي 40,000 خليّة لكلّ شخص. يشار أحياناً إلى المنحنيات الأسّية بالحرف «J»، لأنّها تحاكي شكله. بطبيعة الحال، مع استهلاك البكتيريا للعناصر الغذائية الموجودة في الحليب وتغيّر درجة حموضته، تتدهور ظروف النموّ ولا تستمرّ الزيادة الأسّية إلّا لفترة قصيرة نسبيّاً من الزمن. في الواقع، وفي كلّ سيناريو واقعي تقريباً، فإنّ النموّ الأسّي طويل الأمد غير مستدام، لا بل هو مَرضي في كثير من الحالات، ذلك أنّ موضوع النموّ يستهلك الموارد بطريقة غير قابلة للحياة. هكذا يُعدّ النموّ الأسّي للخلايا في الجسم مثلاً السمة المميّزة للسرطان.



الشكل 2: منحنى النموّ الأسّي على شكل J
(إلى اليسار) ومنحنى الاضمحلال الأسّي (إلى اليمين).

مثال آخر على المنحنى الأسّي هو السقوط المائي الحرّ، والذي أُطلق عليه هذا الاسم لأنّ الزّلاقة شديدة الانحدار في البداية بحيث تمنح المنزلِق إحساساً بالسقوط الحرّ. هذه المرّة، عندما نسقط عبر الزّلاقة، فإنّنا نعبر منحنى اضمحلال أسّي، وليس منحنى نموّ (يمكن رؤية مثال على ذلك في الرسم البياني في الصورة الثانية من الشكل 2). يحدث الاضمحلال الأسّي عندما تنخفض الكمّية بما يتناسب مع حجمها الحالي. تخيّل مثلاً أن تفتح كيساً كبيراً من سكاكر M&Ms، وتسكبها على الطاولة ثمّ تتناول كلّ الحبّات التي يظهر الحرف M على الجهة المواجهة للأعلى، وتضع الباقي في الكيس للغد. في اليوم التالي، تهزّ الكيس وتسكب محتواه، ثمّ تتناول مجدّداً كلّ الحبّات التي يظهر عليها الحرف M وتضع الباقي في الكيس. وفي كلّ مرّة تصبّ فيها السكاكر، تأكل ما يقارب نصف تلك المتبقّية، بغضّ النظر عن العدد الذي تبدأ به. هكذا يتناقص عدد السكاكر بما يتناسب مع العدد المتبقّي في الكيس، ممّا يؤدّي إلى اضمحلال أسّي في عدد السكاكر. بالطريقة نفسها، تبدأ زلّاقة الماء الأسّية على ارتفاع عالٍ، عمودي تقريباً، بحيث ينخفض ارتفاع المنزلِق بسرعة كبيرة. وعندما يكون لدينا عدد كبير من السكاكر، فإنّ العدد الذي نتناوله يكون كبيراً أيضاً. لكنّ المنحنى يتراجع تدريجيّاً ويصبح أقلّ انحداراً إلى أن يصبح في النهاية أفقياً تقريباً في نهاية الزلّاقة. وكلّما قلّ عدد السكاكر، فإنّنا نتناول كلّ يوم عدداً أقلّ منها. ومع أنّ هبوط حبّة السكاكر بحيث يكون حرف M إلى الأعلى أو الأسفل هو عشوائي وغير متوقّع، إلّا أنّ منحنى الاضمحلال الأسّي المتوقّع للزلّاقة المائية يظهر في عدد السكاكر التي نتركها مع مرور الوقت.

سنكتشف في هذا الفصل الروابط الخفيّة بين السلوك الأسّي والظواهر اليومية، كانتشار أحد الأمراض في مجتمع ما، أو انتشار التعليق المصوّر عبر الإنترنت؛ النموّ السريع للجنين، أو النموّ البطيء للغاية للأموال في حساباتنا المصرفية؛ الطريقة التي نتصوّر بها الوقت، وحتّى انفجار قنبلة نووية. ومع تقدّمنا، سنكتشف تدريجيّاً المأساة الكاملة لمخطّط العطاء المتبادل الهرمي. فقصص الأشخاص الذين تمّ امتصاص أموالهم وابتلاعها توضح مدى أهمّية القدرة على التفكير الأسّي، والذي يساعدنا بدوره على توقّع وتيرة التغيّر المفاجئة أحياناً في العالم الحديث.

مسألة بالغة الأهمّية

في المناسبات النادرة جدّاً التي أودع فيها أموالاً في حسابي المصرفي، تريحني حقيقة أنّه بغضّ النظر عن قلّة المال الذي أملكه، فإنّه ينمو باستمرار بشكل أسّي. في الواقع، فإنّ الحساب المصرفي هو أحد الأماكن الذي لا يوجد فيها قيود حقيقية على النموّ الأسّي، على الأقلّ على الورق. فشريطة أن تتمّ مضاعفة الفائدة (أي إضافة الفائدة إلى المبلغ الأوّلي لنكسب فائدة على الفائدة نفسها)، يزداد المبلغ الإجمالي الموجود في الحساب بما يتناسب مع حجمه الحالي، وهذه هي السمة المميِّزة للنموّ الأسّي. وكما أشار بنجامين فرانكلين: «المال يولّد المال، والمال الذي يولّد المال يولّد مزيداً من المال». ولكن لا تذهب وتجمّد قرشك الأبيض على الفور، لأنّك عندما تستثمر مائة جنيه بفائدة تبلغ 1% سنويّاً، ستستغرق أكثر من 900 سنة لتصبح مليونيراً. فعلى الرغم من أنّ النموّ الأسّي غالباً ما يرتبط بالزيادات السريعة، إلّا أنّه يمكن أن يكون بطيئاً جدّاً إذا كان معدّل النموّ ومبلغ الاستثمار الأوّلي ضئيلَين.

الجانب السلبي لذلك أنّه نظراً لفرض سعر فائدة ثابت على المبلغ المستحقّ (والذي غالباً ما يكون مرتفعاً)، من شأن الديون المستحقّة على بطاقات الائتمان أن تنمو بشكل أسّي هي الأخرى. وكما هو الحال مع الرهون العقارية كلّما سدّدت بطاقاتك الائتمانية في وقت أبكر وكان المبلغ الذي تسدّده أكبر، ينخفض المبلغ الإجمالي الذي تدفعه في النهاية، ولا يحصل النموّ الأسّي على فرصة للإقلاع.

* * *

كان سداد القروض العقارية والديون الأخرى أحد الأسباب الرئيسة التي قدّمها ضحايا مشروع العطاء المتبادل لمشاركتهم فيه في المقام الأوّل. إذ تغلّب إغراء الكسب السريع والسهل

لتخفيف الضغوط المالية على مقاومة كثير من الأشخاص على الرغم من شكوكهم في وجود خطب ما. وهنا يقرّ كاديك: «بحسب القول المأثور، إذا بدا شيء ما أنّه رائع على نحو لا يصدّق، فلا ينبغي تصديقه على الأرجح».

كانت صاحبتا المشروع هما المتقاعدتين لورا فوكس وكارول تشالمرز، وكانتا صديقتين منذ أيّامهما في مدرسة دير كاثوليكي. شكّلت المرأتان ركناً أساسياً في مجتمعهما المحلّي - إحداهما رئيسة نادي روتاري محلّي، والأخرى جدّة تتمتّع باحترام كبير - وكانتا تعرفان تماماً ما تفعلانه عندما وضعتا مخطّطهما الاستثماري الاحتيالي. صُمّم مشروع العطاء المتبادل بذكاء للإيقاع بالمستثمرين المحتملين، مع إخفاء المخاطر عنهم. فخلافاً للمخطّط الهرمي التقليدي المؤلّف من مستويَين، وفيه يأخذ الشخص الذي يحتلّ الجزء العلوي من الهرم الأموال مباشرة من المستثمرين الذين جمّدهم، يقوم مشروع العطاء المتبادل على مخطّط «طائرة» من أربعة مستويات. ففي مخطّط الطائرة، يُعرف الشخص الموجود في أعلى الهرم باسم «الطيّار». ويقوم الطيّار بتجنيد «طيّارَين مساعدَين»، يجنّدان كلّ بدوره «أفراد طاقم»، ويقوم كلّ من هؤلاء في النهاية بتجنيد «راكبَين». وفي مشروع فوكس وتشالمرز، بمجرّد اكتمال التسلسل الهرمي لـ 15 شخصاً، دفع الركّاب الثمانية مبلغ 3,000 جنيه استرليني لمؤسِّستَي المشروع، اللتين دفعتا مبلغاً كبيراً قدره 23,000 جنيه للمستثمر الأساسي واقتطعتا 1,000 جنيه عند القمّة. فتمّ التبرّع بجزء من هذا المبلغ للجمعيات الخيرية، مع خطابات شكر من جمعيات أمثال الجمعية الوطنية لمنع القسوة ضدّ الأطفال (NSPCC) من أجل إضفاء شرعية على المشروع. واحتفظت صاحبتا المشروع بجزء من المبلغ لضمان استمرار التشغيل السلس.

بعد حصول الطيّار على حصّته من المال، يخرج من المشروع وتتمّ ترقية الطيّارَين المساعدَين إلى رتبة طيّار، بانتظار تجنيد ثمانية ركّاب جدد في أسفل الهرم. تعدّ مخطّطات الطائرة مغرية جدّاً للمستثمرين، إذ لا يحتاج فيها المشاركون الجدد سوى إلى تجنيد شخصين آخرَين من أجل مضاعفة استثماراتهم بعامل ثمانية (على الرغم من أنّه يتعيّن بالطبع على هذين الشخصين تجنيد اثنين آخرَين، وهكذا دواليك). وثمّة مخطّطات أخرى تتطلّب مجهوداً أكبر على صعيد التجنيد للفرد الواحد مقابل العوائد نفسها. غير أنّ البنية شديدة الانحدار لمشروع العطاء المتبادل القائمة على أربعة مستويات لم تتطلّب من أفراد الطاقم استلام الأموال مباشرة من الركّاب الذين جنّدوهم. فبما أنّ المجنّدين الجدد يحتمل أن يكونوا من أصدقاء وأقارب أفراد الطاقم، فقد ضمن ذلك عدم انتقال الأموال إطلاقاً بشكل مباشر بين المعارف المقرّبين. وهذا الفصل بين الركّاب والطيّارين،

الذين يستمدّون الأموال من الركّاب، يجعل التجنيد أسهل والانتقام أقلّ احتمالاً، كما يزيد من جاذبية الفرصة الاستثمارية، ويسهّل بالتالي تجنيد الآلاف من المستثمرين في المخطّط.

بالطريقة نفسها، تمّ تشجيع كثير من المستثمرين في مخطّط العطاء المتبادل الهرمي على الاستثمار من خلال قصص المكاسب الناجحة التي تمّ تحصيلها سابقاً، وفي بعض الحالات، شوهدت هذه المكاسب بشكل مباشر. فقد استضافت منظِّمتا المشروع، فوكس وتشالمرز، حفلات خاصّة فاخرة في فندق سومرسيت، الذي تملكه تشالمرز. وتضمّنت المنشورات التي وُزّعت في الحفلات صوراً لأعضاء المشروع، مستلقين على أسرّة مغطّاة بالنقود أو يلوّحون بالمال أمام الكاميرا. وفي كلّ من هذه الحفلات، قامت المنظِّمتان بدعوة بعض عرائس «البرنامج»، وهم أشخاص (معظمهم من النساء) وصلوا إلى منصب طيّار في خليّتهم الهرمية، وينتظرون استلام مكاسبهم. وكانت تُطرح على العرائس سلسلة من أربعة أسئلة بسيطة مثل «أيّ جزء من بينوكيو ينمو عندما يكذب؟» أمام جمهور من 200 إلى 300 مستثمر محتمل.

كان من المفترض لجانب «المسابقة» في البرنامج أن يستغلّ ثغرة في القانون، اعتقدت فوكس وتشالمرز أنّها تسمح بهذا النوع من الاستثمارات إذا اشتمل على عنصر «المهارة». ففي تسجيل هاتفي لإحدى تلك الحفلات، سُمع صوت فوكس وهي تصرخ: «نحن نمارس القمار في منازلنا، وهذا ما يجعله قانونياً». غير أنّها كانت مخطئة. إذ أوضح مايلز بينيت، المحامي الذي لاحق القضية: «كانت المسابقة سهلة للغاية، وما من شخص في موقع استلام المكاسب لم يحصل على ماله. حتّى إنّه كان بإمكانه طلب المساعدة من صديق أو من عضو في اللجنة، وكانت اللجنة تعرف الإجابات!».

لم يمنع ذلك فوكس وتشالمرز من استخدام حفلات منح الجوائز كإغراءات في حملتهما التسويقية منخفضة التكنولوجيا التي انتشرت على نطاق واسع. فعند رؤية العرائس يستلمون شيكات بقيمة 23,000 جنيه استرليني، أقدم كثير من المدعوين على الاستثمار وتشجيع أصدقائهم وعائلاتهم على ذلك، مشكّلين هرماً تحتهم. فطالما أنّ كلّ مستثمر جديد يمرّر عصا القيادة إلى اثنين أو أكثر، سيستمرّ المشروع إلى أجل غير مسمّى. عندما بدأت فوكس وتشالمرز المشروع في ربيع عام 2008، كانتا الطيّارتين الوحيدتين. وبتجنيد أصدقاء للاستثمار والمساعدة في تنظيم البرنامج، سرعان ما جلبتا أربعة أشخاص آخرين معهما. وقام أولئك الأربعة بتجنيد ثمانية آخرين، ومن ثمّ 16، وهكذا دواليك. تحاكي هذه المضاعفة الأسّية لأعداد المجنّدين الجدد عن كثب تضاعُف عدد الخلايا في جنين وهو ينمو.

الجنين الأسّي

عندما حملت زوجتي للمرّة الأولى، أصابنا الهوس، مثل عديد من الآباء والأمّهات الجدد، لرغبتنا في معرفة ما يدور في أحشاء زوجتي. فاستعرنا جهازاً لمراقبة القلب بالموجات ما فوق الصوتية من أجل الاستماع إلى نبضات قلب طفلتنا، واشتركنا في التجارب السريرية لإجراء فحوصات إضافية، وقرأنا مواقع الويب واحداً تلو الآخر لمعرفة ما يجري مع ابنتنا وهي تنمو وتسبّب لزوجتي الغثيان يوميّاً. وكانت المواقع المفضّلة لدينا هي تلك التي تتحدّث عن حجم الجنين، وتقارن حجمه كلَّ أسبوع من الحمل بحجم أحد أنواع الفاكهة أو الخضار. فيعطونكم جملاً ساخرة مثل «يزن ملاككما الصغير نحو أوقية ونصف ويبلغ طوله نحو ثلاثة إنشات ونصف، أي بحجم ليمونة تقريباً»، أو «أصبحت إجاصتكما الصغيرة الغالية بوزن خمس أونصات وبطول خمس إنشات تقريباً من الرأس حتّى القدمين».

ما أدهشني حقّاً في مقارنات هذه المواقع هو مدى سرعة تغيّر الأحجام من أسبوع إلى آخر. ففي الأسبوع الرابع، يكون الجنين بحجم بذرة الخشخاش تقريباً، لكن في الأسبوع الخامس، يكبر ليصبح بحجم حبّة السمسم! وهذا يمثّل زيادة في الحجم تقارب 16 ضعفاً على مدار أسبوع واحد.

لكن لا عجب حقّاً في هذه الزيادة السريعة في الحجم. فعندما يتمّ تخصيب البويضة في البداية بواسطة الحيوان المنوي، يخضع الزيغوت الناتج عن ذلك لجولات متسلسلة من الانقسام الخلوي، تسمح بزيادة عدد الخلايا بسرعة في الجنين النامي. فتنقسم الخليّة في البداية إلى اثنتين. وبعد ثماني ساعات، تنقسم الخليّتان إلى أربع. وبعد ثماني ساعات أخرى، تصبح الخلايا الأربع ثمانية، لتتحوّل سريعاً إلى 16، وهكذا دواليك، تماماً مثل عدد المستثمرين الجدد في كلّ مستوى من مستويات المخطّط الهرمي. وتحدث الانقسامات اللاحقة بشكل متزامن تقريباً كلّ ثماني ساعات. بالتالي، ينمو عدد الخلايا بما يتناسب مع كمّية الخلايا التي تكوّن الجنين في وقت معيّن من الزمن: كلّما زاد عدد الخلايا، كان عدد الخلايا الجديدة الناتجة عن الانقسام اللاحق أكبر. في هذه الحالة، وبما أنّ كلّ خليّة تُنتج خليّة ابنة واحدة في كلّ انقسام، فإنّ عامل مضاعفة خلايا الجنين هو اثنان. بمعنى آخر، يتضاعف حجم الجنين مرّتين مع كلّ جيل من الخلايا.

خلال فترة الحمل البشري، تكون فترة النموّ الأسّي للجنين قصيرة نسبيّاً لحسن الحظّ. ولو استمرّ بالنموّ بالمعدّل الأسّي نفسه طوال فترة الحمل، لنتج عن الـ 840 انقساماً خلوياً متزامناً رضيعٌ

خارق يتكوّن من نحو 25310 خلية. لتقريب الفكرة، إذا كانت كلّ ذرّة في الكون هي نفسها نسخة عن كوننا، فإنّ العدد الإجمالي للذرّات في كلّ هذه الأكوان سيكون معادلاً تقريباً لعدد خلايا الطفل الخارق. بطبيعة الحال، يتباطأ انقسام الخلايا مع التحوّلات الأكثر تعقيداً التي تشهدها حياة الجنين. ويمكن تقدير عدد الخلايا التي تكوّن طفلاً حديث الولادة بشكل تقريبي ومتواضع بتريليونَي خليّة. وهو عدد يمكن تحقيقه في أقلّ من 41 انقساماً متزامناً.

مدمّر العوالم

يعدّ النموّ الأسّي شرطاً حيوياً للتوسّع السريع في عدد الخلايا اللازمة لتكوين حياة جديدة. غير أنّ القوّة المذهلة والمرعبة للنموّ الأسّي هي التي دفعت بعالم الفيزياء النووي ج. روبرت أوبنهايمر إلى القول: «الآن أصبحتُ الموت، مدمّر العوالم». إذ لم يكن هذا النموّ نموَّ خلايا، ولا حتّى كائنات فردية، بل نموّ طاقة ناتجة عن انقسام نواة ذرّية.

خلال الحرب العالمية الثانية، كان أوبنهايمر رئيس مختبر لوس ألاموس، مقرّ مشروع مانهاتن لتطوير القنبلة الذرّية. وكان الكيميائيون الألمان قد اكتشفوا في عام 1938 إمكانية انقسام نواة الذرّة الثقيلة (المؤلّفة من بروتونات ونيوترونات مترابطة بإحكام) إلى أجزاء تأسيسية أصغر. وسُمّيت «الانشطار النووي» قياساً على الانشطار الثنائي، أو الانقسام، لخليّة واحدة إلى اثنتين، كما يحدث في الجنين النامي. وتبيّن أنّ الانشطار يحدث إمّا طبيعياً، مثل التحلّل الإشعاعي للنظائر الكيميائية غير المستقرّة، أو يتمّ حفزه صناعياً عن طريق قصف نواة إحدى الذرّات بجزيئات دون ذرّية، في ما يسمّى «التفاعل النووي». وفي كلتا الحالتين، يكون انقسام النواة إلى نواتين أصغر، أو نواتج انشطار، متزامناً مع إطلاق كمّيات كبيرة من الطاقة على شكل إشعاع كهرومغنطيسي، فضلاً عن الطاقة المرتبطة بحركة نواتج الانشطار. وسرعان ما تبيّن أنّه بالإمكان استخدام هذه النواتج المتحرّكة، الناشئة عن أوّل تفاعل نووي، للتأثير على نوى أخرى، لتقسيم مزيد من الذرّات وإطلاق المزيد من الطاقة، وهذا ما يسمّى «التفاعل النووي المتسلسل». وفي حال أنتج كلّ انشطار نووي، في المتوسّط، أكثر من ناتج واحد يمكن استخدامه لتقسيم الذرّات اللاحقة، فإنّه يمكن لكلّ انشطار، من الناحية النظرية، أن يحفز انقسامات أخرى متعدّدة. وباستمرار هذه العمليّة، سيزداد عدد التفاعلات بشكل أسّي، ممّا يُنتج طاقة على نطاق غير مسبوق. وإذا عُثر على مادّة تسمح بهذا التفاعل النووي المتسلسل غير المنضبط، فإنّ الزيادة الهائلة في الطاقة المنبعثة خلال الفترة الزمنية القصيرة للتفاعلات قد تسمح بتحويل هذه المادّة الانشطارية إلى سلاح.

في أبريل 1939، عشية اندلاع الحرب في جميع أنحاء أوروبا، قام الفيزيائي الفرنسي فريدريك جوليو كوري (صهر ماري وبيار، الحائز هو أيضاً على جائزة نوبل بالتعاون مع زوجته)، باكتشاف هامّ. فقد نشر في مجلّة *ناتور* دليلاً على أنّه، عند حدوث انشطار ناجم عن نترون واحد، تطلق ذرّات نظير اليورانيوم، 253U، ما معدّله 3.5 (نُقّح الرقم لاحقاً إلى 2.5) نيوترون عالي الطاقة[6]. وكانت تلك بالضبط هي المادّة المطلوبة لحفز سلسلة التفاعلات النووية ذات النموّ الأسّي. هكذا بدأ «سباق القنبلة».

مع عمل فيرنر هايزنبرغ، الحائز على جائز نوبل، وغيره من علماء الفيزياء الألمان المشهورين، على مشروع القنبلة الموازي لصالح النازيين، عرف أوبنهايمر أنّ عمله قد توقّف في لوس ألاموس. كان التحدّي الرئيس الذي واجهه يكمن في تهيئة الظروف التي من شأنها تسهيل حدوث تفاعل نووي متسلسل يتنامى باطّراد، ممّا يسمح بالإطلاق الفوري تقريباً لكمّيات هائلة من الطاقة اللازمة لقنبلة ذرّية. لإنتاج هذا التفاعل المتسلسل ذاتي الاستدامة والسريع بما فيه الكفاية، كان بحاجة إلى التأكّد من أنّ كمّية كافية من النيوترونات المنبعثة من ذرّة 235U المنشطرة قد تمّ امتصاصها من قِبل نوى ذرّات 253U الأخرى، مؤدّية إلى انقسامها بدورها هي أيضاً. فوجد أنّه في اليورانيوم الطبيعي، يتمّ امتصاص عدد كبير من النيوترونات المنبعثة من قبل 238U (النظير الآخر، الذي يشكّل 99.3% من اليورانيوم الطبيعي[7]) ممّا يعني أنّ أيّ تفاعل متسلسل سيموت أسّياً بدلاً من النموّ. من أجل إنتاج تفاعل متنامي أسّياً، كان أوبنهايمر بحاجة إلى تكرير 235U نقيّ للغاية عن طريق إزالة أكبر قدر ممكن من 238U في المعدن الخام.

أدّت هذه الاعتبارات إلى نشوء فكرة ما يسمّى *الكتلة الحرجة* للمادّة الانشطارية. والكتلة الحرجة من اليورانيوم هي كمّية الكتلة اللازمة لتوليد تفاعل نووي متسلسل ذاتي الاستدامة. يعتمد ذلك على مجموعة متنوّعة من العوامل، قد يكون أهمّها نقاء 235U. وحتّى مع وجود 20% من 235U (مقارنة بنسبة 0.7% الطبيعية)، تبقى الكتلة الحرجة فوق 400 كيلوغرام، ممّا يجعل درجة النقاء العالية ضرورية لصنع قنبلة مجدية. وحتّى عندما قام بتكرير يورانيوم نقيّ بما فيه الكفاية لتحقيق درجة فائقة الحراجة، ظلّ أوبنهايمر يواجه تحدّي تسليم القنبلة نفسها. فبالطبع، لا يمكنه تعليب كتلة حرجة من اليورانيوم في قنبلة على أمل ألّا تنفجر. ذلك أنّه من شأن اضمحلال واحد يحدث بشكل طبيعي في المادّة أن يحفز سلسلة من التفاعلات ويتسبّب بالانفجار الأسّي.

مع شبح مطوّري القنبلة النازيين الذي يلوح أمامه باستمرار، خرج أوبنهايمر وفريقه بفكرة تمّ تطويرها على عجل لتسليم القنبلة الذرّية. تضمّنت طريقة «إطلاق النار» إطلاق كتلة دون حرجة

من اليورانيوم على كتلة أخرى، باستخدام متفجّرات تقليدية لإنتاج كتلة فوق حرجة. عندها يبدأ التفاعل المتسلسل بحدث انشطار تلقائي يُطلق النيوترونات البادئة. وضَمِن فصل الكتلتين دون الحرجتين عدم انفجار القنبلة إلّا عند الطلب. ونظراً للمستويات العالية لتخصيب اليورانيوم (نحو 80%)، فإنّ الحراجة لن تتطلّب إلّا ما يتراوح بين 20 إلى 25 كيلوغراماً. لكنّ أوبنهايمر لم يستطع المجازفة بفشل مشروعه ومنح الأفضلية لمنافسيه الألمان، لذلك أصرّ على كمّيات أكبر بكثير.

في هذه الحالة، بحلول الوقت الذي تأمّنت فيه أخيراً كمّية كافية من اليورانيوم النقي، كانت الحرب في أوروبا قد وضعت أوزارها. غير أنّها كانت لا تزال مستمرّة في منطقة المحيط الهادئ، ولم تُظهر اليابان علامات الاستسلام على الرغم من الخسائر العسكرية الكبيرة. كان الجنرال ليزلي غروفز، مدير مشروع مانهاتن، يدرك أنّ الغزو البرّي لليابان سيضاعف بشكل كبير الخسائر الأميركية الفادحة أساساً، فما كان منه إلّا أن أصدر الأمر الذي يسمح باستخدام القنبلة الذرّية على اليابان بمجرّد أن تصبح الظروف المناخية مؤاتية.

بعد عدّة أيّام من سوء الأحوال الجوية نتيجة إعصار، أشرقت الشمس في سماء زرقاء فوق هيروشيما في 6 أغسطس 1945. وفي تمام الساعة 07:09 صباحاً، شوهدت طائرة أميركية في سماء المدينة، فانطلقت صفّارات الإنذار في جميع أنحاء المدينة تحذيراً من غارة جوّية. كانت أكيكو تاكاكورا البالغة من العمر 17 عاماً قد عُيّنت مؤخّراً موظّفة في أحد المصارف. وفي طريقها إلى العمل، سمعت صفّارات الإنذار، فاحتمت مع أشخاص آخرين في أحد ملاجئ الغارات الجوية الموزّعة بشكل استراتيجي في أرجاء المدينة.

كانت التحذيرات من الغارات الجوّية أمراً شائعاً في هيروشيما، لكون المدينة قاعدة عسكرية استراتيجية تضمّ مقرّاً للجيش الياباني العامّ الثاني. لكن حتّى ذلك اليوم، نجت المدينة إلى حدّ كبير من القصف الذي طال عديداً من المدن اليابانية الأخرى. لم تكن أكيكو وأهل مدينتها يعرفون الكثير، لكنّ تحييد هيروشيما كان متعمّداً حتّى يتمكّن الأميركيون من قياس النطاق الكامل للدمار الناتج عن سلاحهم الجديد.

عند الساعة السابعة والنصف، توقّفت صفّارات الإنذار. إذ لم تكن طائرة B-29 المحلّقة في الأجواء تشكّل خطراً يُذكر. فتنفّست أكيكو الصعداء وهي تغادر الملجأ مع غيرها من الناس ظنّاً منهم أنّهم لن يتعرّضوا للقصف هذا الصباح.

لم تكن أكيكو وبقيّة سكّان هيروشيما يعرفون وهم يواصلون طريقهم إلى العمل أنّ طائرة B-29 كانت تُرسل تقارير عن صفاء الأجواء فوق هيروشيما إلى إينولا غاي، الطائرة التي تحمل القنبلة الانشطارية المدفعية المعروفة باسم «الولد الصغير». وبينما كان الأطفال ذاهبين إلى مدارسهم والعمّال إلى أشغالهم اليومية في المكاتب والمصانع، وصلت أكيكو إلى المصرف الذي تعمل فيه في وسط هيروشيما. كان يتحتّم على الموظّفات الوصول إلى المكاتب قبل ثلاثين دقيقة من الموظّفين لتنظيفها قبل بدء العمل. لذلك، بحلول الساعة الثامنة وعشر دقائق، كانت أكيكو أساساً داخل المبنى الخالي إلى حدّ كبير، ومنهمكة في العمل.

عند الساعة 08:14، رصد الكولونيل بول تيبيتس الذي يقود إينولا غاي هدفه؛ كان جسراً على شكل T يُعرف باسم جسر أيوي. فأطلق قنبلته البالغ وزنها 4400 كغ، وبدأ الولد الصغير هبوطه عن ارتفاع ستّة أميال باتّجاه هيروشيما. بعد سقوط حرّ لمدّة 45 ثانية تقريباً، تمّ تفعيل القنبلة على ارتفاع نحو 600 متر عن الأرض. فأُطلقت كتلة واحدة دون حرجة من اليورانيوم على أخرى، ممّا أنتج كتلة فائقة الحراجة جاهزة للانفجار. على الفور تقريباً، أطلق الانشطار التلقائي لإحدى الذرّات نيوترونات، وتمّ امتصاص واحدة منها على الأقلّ بواسطة ذرّة $_{235}U$. فانشطرت هذه الذرّة بدورها، وأطلقت المزيد من النيوترونات، التي تمّ امتصاصها بدورها بواسطة مزيد من الذرّات. ثمّ تسارعت هذه العمليّة بسرعة، ممّا أدّى إلى سلسلة من التفاعلات المتنامية أسّياً، وإطلاق كمّيات هائلة من الطاقة في وقت واحد.

بينما كانت أكيكو تمسح الغبار عن مكاتب زملائها الذكور، نظرت من النافذة ورأت وميضاً أبيض ساطعاً، مثل شريط من الماغنيزيوم المحترق. ما لم تكن تعلمه أنّ النموّ الأسّي أتاح للقنبلة بإطلاق طاقة تعادل طاقة 30 مليون إصبع من الديناميت في لحظة واحدة. فقد ارتفعت حرارة القنبلة إلى عدّة ملايين درجة، لتفوق حرارة سطح الشمس. وبعد عُشر من الثانية، بلغ الإشعاع المؤيِّن سطح الأرض، مسبّباً أضراراً إشعاعية مدمّرة لجميع الكائنات الحيّة التي تعرّضت له. بعد ثانية، ارتفعت فوق المدينة كرة نارية بعرض 300م وبحرارة تبلغ آلاف الدرجات المئوية. قال شهود عيان إنّ الشمس أشرقت للمرّة الثانية فوق هيروشيما في ذلك اليوم. أدّت موجة الانفجار التي كانت تتحرّك بسرعة الضوء إلى تسوية جميع أبنية المدينة بالأرض، وألقت أكيكو عبر الغرفة لتسقط وتفقد وعيها. أحرقت الأشعّة ما تحت الحمراء الجلد المكشوف لمسافة أميال في كلّ الاتّجاهات. أمّا الناس الذين كانوا على الأرض بالقرب من مركز القنبلة، فتبخّروا أو تفحّموا على الفور، وتحوّلوا إلى رماد.

نجت أكيكو من أسوأ أضرار القنبلة بفضل مبنى المصرف المقاوِم للزلازل. وعندما استعادت وعيها، خرجت إلى الشارع لتكتشف أنّ سماء الصباح الصافية قد اختفت. أمّا الشمس الثانية التي أشرقت فوق هيروشيما فقد غربت في اللحظة التي أشرقت فيها تقريباً. كانت الشوارع مظلمة، والهواء خانق بسبب الدخان والغبار، بينما تناثرت الجثث على الأرض على مدّ النظر. وعلى مسافة 260 متراً فقط من مركز القنبلة، كانت أكيكو واحدة من أقرب الناجين من الانفجار الأسّي الرهيب.

تشير التقديرات إلى أنّ القنبلة نفسها والعواصف النارية التي نتجت عنها قد تسبّبت بمقتل نحو 70,000 شخص، 50,000 منهم من المدنيين، بينما دُمّرت غالبية مباني المدينة بالكامل. هكذا تحقّقت توقّعات أوبنهايمر. ولا تزال مسوّغات إلقاء القنبلتين فوق هيروشيما، ومن بعدها ناغازاكي بعد تسعة أيّام، في سياق إنهاء الحرب العالمية الثانية موضع جدل حتّى اليوم.

الخيار النووي

أيّاً تكن مسوّغات أو أخطاء القنبلة الذرّية نفسها، فإنّ الفهم الأفضل للتفاعلات المتسلسلة الأسّية الناتجة عن الانشطار النووي الذي تمّ تطويره كجزء من مشروع مانهاتن منحنا التكنولوجيا اللازمة لتوليد طاقة نظيفة وآمنة ومنخفضة الكربون من خلال الطاقة النووية. فمن شأن كيلوغرام واحد من اليورانيوم أن يطلق طاقة مضاعفة تفوق تلك الناتجة عن إحراق الفحم بثلاثة ملايين مرّة تقريباً[8]. وعلى الرغم من الأدلّة التي تشير إلى العكس، إلّا أنّ الطاقة النووية تعاني من سمعة سيّئة على صعيد السلامة والأثر البيئي. ويرجع السبب إلى حدّ ما إلى النموّ الأسّي.

في مساء 25 أبريل 1986، سجّل ألكسندر أكيموف وصوله ليلاً إلى محطّة توليد الطاقة التي كان مشرفاً مناوباً عليها. وكان من المقرّر بدء تجربة مصمّمة لاختبار الإجهاد لنظام مضخّة تبريد بعد ساعتين. عندما بدأ التجربة، كان من الممكن أن يُعذر على اعتقاده أنّه رجل محظوظ. ففي الوقت الذي كان فيه الاتّحاد السوفييتي ينهار و20% من مواطنيه يعيشون في الفقر، كان أكيموف يملك وظيفة مستقرّة في محطة تشيرنوبيل النووية.

عند الساعة 11 مساءً تقريباً، ومن أجل خفض إنتاج الطاقة نحو 20% من قدرة التشغيل العادية لأغراض الاختبار، أدخل أكيموف عن بعد عدداً من قضبان التحكّم بين قضبان وقود اليورانيوم في قلب المفاعل. تعمل قضبان التحكّم على امتصاص بعض النيوترونات المنبعثة بفعل

الانشطار الذرّي، بحيث لا تتسبّب في انشطار عدد كبير من الذرّات الأخرى. وهذا ما يوقف النموّ السريع للتفاعل المتسلسل الذي يُسمح له بالخروج عن السيطرة على نحو أسّي في القنبلة النووية. غير أنّ أكيموف أدخل عن طريق الخطأ عدداً كبيراً من القضبان، ممّا تسبّب في انخفاض إنتاج طاقة المصنع بشكل كبير. كان يعلم أنّ هذا سيسبّب تسمّم المفاعل، أي تكوّن مادّة ستؤدّي، مثل قضبان التحكّم، إلى زيادة تباطؤ المفاعل وخفض درجة الحرارة، لينتج عن ذلك مزيد من التسمّم والتبريد في حلقة مفرغة ذاتية التعزيز. عندما أصابه الذعر، تخطّى أنظمة السلامة، ووضع أكثر من 90% من قضبان التحكّم تحت إشراف يدوي، ونزعها من قلب المفاعل لمنع انطفائه الكلّي المدمّر.

بينما كان أكيموف يشاهد ارتفاع إبر المؤشّر مع ازدياد إنتاج الطاقة ببطء، بدأ نبضه يعود إلى طبيعته تدريجيّاً. بعد أن تفادى الأزمة، انتقل إلى المرحلة التالية من الاختبار وأغلق المضخّات. غير أنّ أكيموف لم يكن يعلم أنّ الأنظمة الاحتياطية لم تكن تضخّ مياه التبريد بالسرعة اللازمة. فمع أنّ اكتشاف ذلك لم يكن ممكناً في البداية، إلّا أنّ مياه التبريد المتدفّقة ببطء تبخّرت، ممّا أضعف قدرتها على امتصاص النيوترونات وخفض حرارة قلب المفاعل. فأدّى ارتفاع الحرارة وإنتاج الطاقة إلى تبخّر مزيد من الماء، ممّا أتاح إنتاج مزيد من الطاقة، في حلقة مفرغة وإيجابية أخرى أكثر خطورة. فتمّت إعادة إدخال قضبان التحكّم القليلة المتبقّية التي لم تكن تحت إشراف أكيموف اليدوي تلقائيّاً لكبح الإنتاج الزائد للطاقة، لكنّها ظلّت غير كافية. وعندما أدرك أكيموف أنّ توليد الطاقة يزداد بسرعة كبيرة، ضغط على زرّ إيقاف التشغيل المخصّص لحالات الطوارئ والمصمّم لإدراج جميع قضبان التحكّم وإطفاء قلب المفاعل، ولكنّ الأوان كان قد فات. فعندما أُدخلت القضبان في المفاعل، سبّبت ارتفاعاً سريعاً ولكنّه مهمّ في إنتاج الطاقة، ممّا رفع حرارة قلب المفاعل بشكل كبير، فتحطّمت بعض قضبان الوقود وتعذّر إدخال المزيد من قضبان التحكّم. ومع ارتفاع الطاقة الحرارية بشكل أسّي، ازداد إنتاج الطاقة إلى عشرة أضعاف مستوى التشغيل المعتاد. فتحوّلت مياه التبريد بسرعة إلى بخار، ممّا تسبّب في انفجارَين ضغطيَين هائلَين، ودمار قلب المفاعل وانتشار المادّة المشعّة الانشطارية على نطاق واسع.

رفض أكيموف تصديق تقارير انفجار قلب المفاعل، ونقل معلومات خاطئة عن حالته، ممّا أخّر جهود الاحتواء الحيوية. وعندما أدرك في نهاية المطاف حجم الدمار الكامل، عمل من دون وقاية مع طاقمه لضخّ المياه في المفاعل المدمّر. بينما كان أعضاء الطاقم يعملون، تلقّوا جرعات بلغت 200 غراي في الساعة. وبما أنّ الجرعة النموذجية القاتلة تبلغ نحو 10 غراي، فقد تعرّض

العمّال غير المحميين إلى جرعات مميتة في أقلّ من خمس دقائق. وتوفّي أكيموف بعد أسبوعين من الحادث نتيجة التسمّم الإشعاعي الحادّ.

بلغ العدد الرسمي للضحايا السوفييت نتيجة كارثة تشيرنوبيل 31 شخصاً فقط، على الرغم من أنّ بعض التقديرات كانت أعلى بكثير، وشملت أشخاصاً شاركوا في عمليّة التنظيف واسعة النطاق. هذا ناهيك عن الوفيات التي سقطت خارج المنطقة المجاورة تماماً لمحطّة الطاقة، والتي تسبّب بها انتشار المادّة المشعّة. فقد اشتعل حريق في قلب المفاعل المدمّر ظلّ مستمرّاً لتسعة أيّام. ونشر الحريق في الغلاف الجوّي كمّية من المواد مشعّة تفوق مئات المرّات تلك التي أطلقتها قنبلة هيروشيما، مخلّفاً عواقب بيئية واسعة النطاق طالت جميع أنحاء أوروبا تقريباً[9].

في عطلة نهاية الأسبوع الثانية من مايو 1986 مثلاً، هطلت أمطار غزيرة على نحو غير معهود في مرتفعات المملكة المتّحدة. واحتوت قطرات المطر المتساقطة على نواتج مشعّة ناجمة عن الانفجار (سترونتيوم-90، سيزيوم-137، ويود-131). بالإجمال، سقط نحو 1% من الإشعاعات المنبعثة من مفاعل تشيرنوبيل على المملكة المتّحدة. فامتصّت التربة هذه النظائر المشعّة التي اندمجت في الحشائش النامية، ثمّ تناولتها الخراف التي رعت العشب. وكانت النتيجة لحوماً مشعّة.

فرضت وزارة الزراعة على الفور قيوداً على بيع وحركة الأغنام في المناطق المتأثّرة، مع ما يترتّب على ذلك من آثار على نحو 9,000 مزرعة، وأكثر من أربعة ملايين من رؤوس الماشية. لم يستطع ديفيد إيلود، صاحب مزرعة للأغنام في مقاطعة لايك تصديق ما يحدث. فالسحابة التي كانت تحمل النظائر المشعّة غير المرئية ألقت بظلالها على مصدر رزقه. وكلّما أراد بيع إحدى الأغنام، كان عليه عزلها والاتّصال بمفتّش حكومي للتحقّق من مستويات الإشعاع لديها. وكلّما أتى المفتّشون، قالوا له إنّ القيود لن تستمرّ سوى لعام آخر أو نحو ذلك. غير أنّ إيلود عاش تحت ظلال هذه السحابة لأكثر من 25 عاماً، إلى أن تمّ رفع القيود أخيراً في عام 2012.

مع ذلك، كان من الأسهل على الحكومة إبلاغ إيلود وغيره من المزارعين متى ستصبح مستويات الإشعاع آمنة بما فيه الكفاية لبيع أغنامهم بحرّية. ذلك أنّه من الممكن بسهولة توقّع مستويات الإشعاع بفضل ظاهرة *الاضمحلال* الأسّي.

علم التأريخ

في تشبيه مباشر بالنموّ الأسّي، يعرَّف الاضمحلال الأسّي على أنّه أيّ كمّية تتناقص بمعدّل يتناسب مع قيمتها الحالية، مثل انخفاض عدد سكاكر M&Ms كلّ يوم ومنحنى الزلّاقة الذي يصف هذا الانخفاض. ويشمل الاضمحلال الأسّي ظواهر متنوّعة مثل إزالة المخدرات من الجسم[10]، ومعدّل انخفاض الرغوة على كأس من البيرة[11]. وهو يصف بشكل ممتاز وتيرة انخفاض مستويات الإشعاع المنبعثة من مادّة مشعّة بمرور الزمن[12].

تُصدر ذرّات المواد المشعّة غير المستقرّة الطاقة تلقائيّاً على شكل إشعاعات، حتّى من دون وجود حافز خارجي، في عمليّة تعرف باسم الاضمحلال الإشعاعي. على مستوى الذرّة الفردية، تكون عمليّة الاضمحلال عشوائية، وتشير نظرية الكمّ إلى أنّه من المستحيل التكهّن بموعد اضمحلال ذرّة معيّنة. ولكن على مستوى المادّة التي تحتوي على عدد هائل من الذرّات، من الممكن توقّع الاضمحلال الأسّي الذي ينخفض على أساسه النشاط الإشعاعي. إذ يتناقص عدد الذرّات بما يتناسب مع العدد المتبقّي. وتضمحلّ كلّ ذرّة بشكل مستقلّ عن غيرها. بالتالي يمكن أن يتميّز معدّل الاضمحلال بنصف عمر المادّة، وهو الوقت الذي يستغرقه اضمحلال نصف الذرّات غير المستقرّة. وبما أنّ الاضمحلال أسّي، فإنّ الوقت اللازم لانخفاض النشاط الإشعاعي إلى النصف سيكون هو نفسه دائماً، بغضّ النظر عن مقدار المادّة المشعّة الموجودة في البداية. فعندما نسكب سكاكر M&Ms على الطاولة يوميّاً ونتناول تلك التي يكون الحرف M ظاهراً عليها، يؤدّي ذلك إلى نصف عمر يوم واحد - نتوقّع أن نأكل نصف السكاكر في كلّ مرّة نسكبها على الطاولة.

تُعتبر ظاهرة الاضمحلال الأسّي للذرّات المشعّة أساس التأريخ الإشعاعي، وهي الطريقة المستخدمة لتأريخ الموادّ بحسب مستويات نشاطها الإشعاعي. فبمقارنة وفرة الذرّات المشعّة بتلك الموجودة في منتجات الاضمحلال المعروفة، يمكننا نظرياً تحديد عمر أيّ مادّة تُصدر إشعاعات ذرّية. وللتأريخ الإشعاعي استخدامات معروفة، بما في ذلك تقدير عمر الأرض وتحديد عهد التحف الأثرية، مثل مخطوطات البحر الميت[13]. فإذا كنت تتساءل كيف عرف العلماء أنّ الأركيوبترِكس يرجع إلى 150 مليون عام[14] أو أنّ أوتزي رجل الجليد توفّي قبل 5300 عام[15]، فمن المحتمل أن يكون للتأريخ الإشعاعي دور في ذلك.

في الآونة الأخيرة، سهّلت تقنيات قياس أكثر دقّة استخدام التأريخ الإشعاعي في علم الآثار المرتبط بالطبّ الشرعي - استخدام الاضمحلال الأسّي للنظائر المشعّة (من بين تقنيات أثرية أخرى) لحلّ الجرائم. ففي نوفمبر 2017، تمّ استخدام التأريخ بالكربون المشعّ لفضح عمليّة احتيال بشأن أغلى أنواع الويسكي في العالم. إذ ثبت أنّ الزجاجة التي صُنّفت على أنّها ويسكي شعير

ماكالان يبلغ عمرها 130 عاماً ليست سوى مزيج رخيص من سبعينيات القرن العشرين، ممّا أثار استياء الفندق السويسري الذي كان يبيع الكأس الواحد منها بـ 10,000$. وفي ديسمبر 2018، في إطار التحقيقات اللاحقة، اكتشف المختبر نفسه أنّ أكثر من ثلث أنواع السكوتش ويسكي المعتّقة التي تمّ اختبارها كان مزيّفاً أيضاً. لكن قد يكون الاستخدام الأشهر للتأريخ الإشعاعي يهدف إلى التحقّق من عهد الأعمال الفنّية التاريخية.

* * *

قبل الحرب العالمية الثانية، كان من المعروف وجود 35 لوحة فقط للرسّام الهولندي يوهانس فيرمير. لكن في عام 1937، اكتُشف عمل مميّز جديد له في فرنسا. أشاد نقّاد الفنّ بلوحة *عشاء إيماوس* على أنّها من أعظم أعمال فيرمير، وتمّ شراؤها بثمن باهظ من قبل متحف بويمانز فان بويننغن في روتردام. وعلى مدى السنوات القليلة التالية، ظهرت عدّة أعمال أخرى لفيرمير لم تكن معروفة بعد. تمّ شراء تلك اللوحات بسرعة من قبل الهولنديين الأثرياء خوفاً إلى حدّ ما من ضياع هذا الإرث الثقافي الهامّ لصالح النازيين. مع ذلك، آل مصير إحدى لوحات فيرمير تلك، *المسيح والخاطئة*، إلى هيرمان غورينغ، خليفة هتلر المنتظر.

بعد الحرب، عندما اكتُشفت لوحة فيرمير المفقودة في منجم ملح نمساوي، إلى جانب الكثير من الأعمال الفنّية المنهوبة من قبل النازيين، أُجري بحث كبير لمعرفة الشخص المسؤول عن بيع اللوحات. فتبيّن في نهاية المطاف، أنّ لوحة فيرمير ترجع إلى هان فان ميغيرين، وكان هو نفسه فناناً فاشلاً تعرّضت أعماله لسخرية كثير من نقّاد الفنّ لكونها مستمدّة من كبار الفنّانين القدماء. ولا عجب أنّ فان ميغيرين لم يحظَ بشعبية الجمهور الهولندي بعد اعتقاله مباشرة. فقد اشتُبه ببيع ممتلكات ثقافية هولندية للنازيين - وهي جريمة يعاقَب عليها بالإعدام - هذا فضلاً عن كسبه مبالغ ضخمة من المال من تجارته تلك سمحت له بالعيش ببذخ في أمستردام طوال الحرب، بينما كان كثير من أهل المدينة يتضوّرون جوعاً. في محاولة يائسة للحفاظ على الذات، ادّعى فان ميغيرين أنّ اللوحة التي باعها إلى غورينغ لم تكن لوحة أصليّة لفيرمير، بل قام بتزويرها بنفسه. كما اعترف بتزوير اللوحات الجديدة الأخرى لفيرمير، وكذلك الأعمال المكتشفة مؤخّراً لفرانس هالز وبيتر دي هوك.

تمّ تشكيل لجنة متخصّصة في كشف عمليّات التزوير للتحقيق في مزاعم فان ميغيرين، وذلك استناداً إلى لوحة مزوّرة جديدة بعنوان *المسيح والأطبّاء*، طلبَت منه اللجنة أن يعيد رسمها مجدّداً.

عندما بدأت محاكمة فان ميغيرين في عام 1947، كان قد أصبح بطلاً قومياً، باعتباره خدع نقّاد الفنّ النخبويين الذين سخروا منه، كما خدع القيادة النازية العليا ودفعها لشراء أعمال فنّية مزيّفة لا قيمة لها. فتمّت تبرئته من التعامل مع النازيين وحُكم عليه بالسجن لعام واحد فقط بتهمة التزوير والاحتيال، لكنّه توفي بنوبة قلبية قبل بدء عقوبته. على الرغم من الحكم، ما زال كثيرون (لا سيّما أولئك الذين اشتروا لوحات فيرمير فان ميغيرين) يعتقدون أنّ اللوحات أصليّة واستمرّوا بالطعن في النتائج.

في عام 1967، استُخدم التأريخ الشعاعي بالرصاص-210 لإعادة فحص لوحة العشاء في إيماوس[16]. فمع أنّ فان ميغيرين كان دقيقاً في تزويره، واستخدم العديد من المواد التي كان فيرمير يستخدمها أصلاً، إلّا أنّه لم يستطع التحكّم بالطريقة التي تمّ فيها إنشاء هذه المواد. فسعياً وراء الأصالة، استخدم لوحات أصلية من القرن السابع عشر، ومزج الألوان وفقاً للصيغ الأصلية، لكنّ الرصاص الذي استخدمه في الطلاء الأبيض المرتكز على الرصاص لم يُستخرج إلّا حديثاً. يحتوي الرصاص الطبيعي على نظير مشعّ يسمّى الرصاص-210 والنوع المشعّ السابق له (الذي ينتج عنه الرصاص بالتحلّل)، وهو الراديوم-226. فعندما يُستخرج الرصاص من المادّة الخام، تتمّ إزالة معظم الراديوم-226، ولا تتبقّى منه سوى كمّيات ضئيلة، ممّا يعني أنّ كمّية الرصاص-210 الجديد التي تظهر في المادّة المستخرَجة قليلة نسبيّاً. وبمقارنة تركيز الرصاص-210 والراديوم-226 في العيّنات، من الممكن تأريخ طلاء الرصاص بدقّة استناداً إلى حقيقة أنّ النشاط الإشعاعي للرصاص-210 ينخفض أسّياً بنصف عمر معروف. تمّ العثور على نسبة أعلى بكثير من الرصاص-210 في لوحة *العشاء في إيماوس* ممّا لو كانت اللوحة قد رُسمت بالفعل قبل 300 عام. وهذا ما أثبت بشكل قاطع أنّ أعمال فان ميغيرين المزيّفة لم تُرسَم بريشة فيرمير في القرن السابع عشر، لأنّ الرصاص الذي استخدمه فيرمير في طلائه لم يكن قد استُخرج بعد.

انفلونزا دلو الثلج

لو أنّ فان ميغيرين ما زال حيّاً يرزق، لتمّ اختصار أعماله بطريقة مرتّبة في مقالة واضحة تحت عنوان «تسع لوحات لن تصدّق أنّها ليست أصلية»، ونُشرت عبر الإنترنت. فالأعمال المزيّفة في عصرنا، مثل الصورة المزوّرة لمرشّح الرئاسة المليونير ميت رومني التي يظهر فيها ستّة مؤيّدين يؤلّفون الكلمة RMONEY (المال) بدلاً من ROMNEY، أو الصور المعدّلة بالفوتوشوب للسائح الذي يقف على منصّة المشاهدة للبرج الجنوبي لمركز التجارة العالمي، غير

مدرك على ما يبدو للطائرة التي تحلّق على ارتفاع منخفض في الخلفية، حقّقت الانتشار العالمي الذي يحلم به المسوّقون عبر الإنترنت.

التسويق الفيروسي هو الظاهرة التي يتمّ من خلالها تحقيق الأهداف الإعلانية من خلال عمليّة تكرار ذاتية تشبه انتشار المرض الفيروسي (سنطّلع على الرياضيّات المرتبطة بهذا الموضوع بشكل أعمق في الفصل 7). إذ يقوم فرد واحد في الشبكة بنقل العدوى إلى آخرين، وينقلون هم بدورهم العدوى إلى غيرهم. وما دام كلّ فرد التقط العدوى حديثاً ينقلها إلى شخص آخر واحد على الأقلّ، فإنّ الرسالة الفيروسية ستنمو بشكل أسّي. يشكّل التسويق الفيروسي مجالاً فرعياً لحقل يُعرف باسم علم التعليقات المصوّرة (memetics)، وفيه ينتشر التعليق المصوّر - أسلوب، أو سلوك، أو فكرة - بين الناس عبر شبكة اجتماعية، مثل الفيروس. ابتكر ريتشارد دوكينز كلمة «meme» في كتابه الصادر عام 1976، تحت عنوان *الجينة الأنانية (The Selfish Gene)*، لشرح الطريقة التي تنتشر بها المعلومات الثقافية. وعرّفها على أنّها وحدات الانتقال الثقافي. فعلى غرار الجينات، وهي وحدات الانتقال الوراثي، اقترح أنّه بإمكان الميمات أن تتكاثر ذاتياً وتتحوّر. وشملت الأمثلة التي أعطاها الإيقاعات، والعبارات الشائعة، وفي إشارة بريئة ورائعة إلى الزمن الذي ألّف فيه الكتاب، طُرق صنع الأواني أو بناء القناطر. بالطبع، في عام 1976، لم يكن دوكينز يعرف شيئاً عن الإنترنت في شكلها الحالي، التي سمحت بنشر ميمات لا يمكن تصوّرها (ولا جدوى لها) في ذلك الحين.

من الأمثلة الأكثر نجاحاً، للتسويق الفيروسي كان تحدّي دلو الثلج لصالح جمعية التصلّب الجانبي الضموري (ALS). فخلال صيف عام 2014، انتشرت في نصف الكرة الشمالي ظاهرة تصوير فيديو لأشخاص وهم يصبّون على رؤوسهم دلواً من الماء البارد قبل تسمية آخرين لفعل الشيء نفسه، والتبرّع في أثناء ذلك للجمعيات الخيرية. أنا نفسي التقطتُ العدوى.

التزاماً بالقواعد الكلاسيكية لتحدّي دلو الثلج، قمت بتسمية شخصَين آخرَين في الفيديو الذي سجّلتُه، ووضعتُ علامة لهما عندما حمّلتُ الفيديو على وسائل التواصل الاجتماعي. وكما هو الحال مع النيوترونات في المفاعل النووي، ما دام شخص واحد على الأقلّ يقبل التحدّي لكلّ فيديو منشور، فإنّ «الميم» تصبح مكتفية ذاتياً، ممّا يؤدّي إلى تفاعل متسلسل يتزايد بشكل أسّي.

في بعض أشكال التحدّي، يمكن للمرشّحين إمّا مواجهة التحدّي والتبرّع بمبلغ صغير إلى جمعية التصلّب الجانبي الضموري (ALS) أو جمعية خيرية أخرى من اختيارهم، أو اختيار تجنّب

التحدّي والتبرّع بمبلغ أكبر تعويضاً عن ذلك. وبالإضافة إلى زيادة الضغط على المرشّحين للمشاركة في «الميم»، كان لدى الجمعية الخيرية مكافأة إضافية تتمثّل في جعل الناس يشعرون بالرضا عن أنفسهم من خلال زيادة الوعي، وتعزيز صورة إيجابية غيرية عن أنفسهم. وقد ساهم هذا الجانب المنطوي على ثناء ذاتي في زيادة قدرة «الميم» على العدوى. وبحلول بداية سبتمبر 2014، أبلغت جمعية ALS أنّها تلقّت تمويلاً إضافياً يفوق 100 مليون دولار من أكثر من ثلاثة ملايين مانح. ونتيجة للتمويل الذي أثمر عنه التحدّي، اكتشف الباحثون جينة ثالثة مسؤولة عن مرض التصلّب الجانبي الضموري، ممّا يدّل على الأثر بعيد المدى للحملة سريعة الانتشار[17].

على غرار بعض الفيروسات شديدة العدوى مثل الإنفلونزا، كان تحدّي دلو الثلج موسمياً للغاية هو الآخر (هذه ظاهرة مهمّة، تتغيّر فيها وتيرة انتشار المرض على مدار العام، وهي ناحية سنتناولها أيضاً في الفصل 7). فمع اقتراب الخريف وحلول الطقس البارد في نصف الكرة الشمالي، لم يعد التبلّل بالماء الجليدي أمراً ممتعاً، والسبب وجيه. هكذا بحلول سبتمبر، هدأ الجنون إلى حدّ كبير. لكن تماماً مثل الأنفلونزا الموسمية، عاد في الصيفَين التاليَين بأشكال مشابهة، ولكن في مجتمعات مشبعة إلى حدّ كبير. وفي عام 2015، جمع التحدّي مبلغاً يقلّ عن واحد بالمائة من ذاك الذي وفّره في العام السابق لجمعية ALS. فالأشخاص الذين تعرّضوا للفيروس في عام 2014 اكتسبوا مناعة قوية ضدّه، وحتّى ضدّ سلالات متحوّرة بعض الشيء (كمواد مختلفة في الدلو، على سبيل المثال). نتيجة المناعة التي أنتجتها اللامبالاة، سرعان ما تلاشى كلّ تفشٍّ جديد مع فشل كلّ مشارك، في المتوسّط، بنقل الفيروس إلى شخص واحد آخر على الأقلّ.

هل المستقبل أسّي؟

ثمّة مثال يشتمل على نموّ أسّي يقال للأطفال الفرنسيين لإيضاح مخاطر المماطلة. ففي أحد الأيّام، ظهرت مستعمرة طحالب صغيرة للغاية على سطح إحدى البحيرات. وخلال الأيّام القليلة التالية، تبيّن أنّ مساحة المستعمرة تتضاعف على سطح المياه كلّ يوم. هذا يعني أنّها ستستمرّ في النموّ على هذا النحو حتّى تغطّي البحيرة بأكملها ما لم يفعل أحدهم شيئاً. إذا تُركت على هذه الحال، فسوف تغطّي سطح البحيرة خلال 60 يوماً وتسمّم مياهها. لكن بما أنّ مستعمرة الطحالب تكون صغيرة جدّاً في البداية ولا تشكّل تهديداً فورياً، فقد تقرّر ترك الطحالب لتنمو حتّى تغطّي نصف سطح البحيرة، وعندها تتمّ إزالتها بسهولة أكبر. فكان السؤال، «في أيّ يوم ستغطّي الطحالب نصف البحيرة؟».

الإجابة الشائعة التي يقدّمها كثير من الناس على هذا السؤال من دون تفكير هي 30 يوماً. لكن بما أنّ حجم المستعمرة يتضاعف مرّتين كلّ يوم، فهذا يعني أنّه إذا كان نصف البحيرة مكسوّاً بالطحالب في أحد الأيّام، فإنّه سيُغمَر بالكامل في اليوم التالي. بالتالي، قد يكون الجواب المثير للدهشة، أنّ الطحالب ستغطّي نصف سطح البحيرة في اليوم 59، تاركة يوماً واحداً فقط لإنقاذ البحيرة. في اليوم الثلاثين، ستستولي الطحالب على أقلّ من واحد على مليار من سعة البحيرة. فلو كنتَ خليّة طحالب في البحيرة، متى ستدرك أنّ المساحة تنفد منك؟ من دون فهم النموّ الأسّي، لو أخبرك أحدهم في اليوم 55 الذي تغطّي فيه الطحالب 3% فقط من السطح، أنّ البحيرة ستختنق تماماً خلال خمسة أيّام، فهل ستصدّق؟ على الأرجح لا.

هذا يسلّط الضوء على الطريقة التي اعتدنا، كبشر، أن نفكّر بها. فبالنسبة إلى أسلافنا، كانت تجارب جيل معيّن تشبه إلى حدّ كبير ما عاشه الجيل السابق. فقد مارسوا الوظائف نفسها، واستخدموا الأدوات نفسها، وعاشوا في الأماكن نفسها، مثل أسلافهم. وكانوا يتوقّعون أن تفعل ذرّيتهم الشيء نفسه. غير أنّ النموّ التكنولوجي والتغيير الاجتماعي يحدث الآن بسرعة كبيرة، بحيث تظهر الاختلافات داخل الجيل الواحد. وبحسب بعض النظريّات، فإنّ معدّل التقدّم التكنولوجي في حدّ ذاته يزداد على نحو أسّي.

قام عالم الكمبيوتر فيرنور فينج بتجميع مثل هذه الأفكار في سلسلة من روايات ومقالات[18] الخيال العلمي، تصل فيها التطوّرات التكنولوجية المتعاقبة بوتيرة متزايدة إلى نقطة تفوق فيها التكنولوجيا الجديدة الفهم البشري. ويؤدّي الانفجار في الذكاء الاصطناعي في نهاية المطاف إلى «تفرّد تكنولوجي»، وظهور ذكاء فائق يمتاز بقوّة وقدرة خارقتين. حاول العالِم المستقبلي الأميركي راي كورزويل إخراج أفكار فينج من عالم الخيال العلمي وتطبيقها على عالم الواقع. ففي عام 1999، افترض كورزويل في كتابه عصر *الآلات الروحية*، «قانون العائدات المتسارعة[19]». فقد اقترح تطوّر مجموعة واسعة من الأنظمة - بما في ذلك تطوّرنا البيولوجي - بوتيرة أسّية. حتّى إنّه ذهب إلى حدّ تحديد تاريخ «التفرّد التكنولوجي» الذي توقّعه فينج، وهي النقطة التي سنشهد فيها - كما وصف كورزويل[20]، «تغيّراً تكنولوجياً سريعاً وعميقاً يشكّل تمزّقاً في نسيج التاريخ البشري» - في نحو عام 2045. ومن بين الآثار المترتّبة على التفرّد، يذكر كورزويل[21] «دمج الذكاء البيولوجي واللابيولوجي، ظهور بشر خالدين مرتكزين على البرمجيات، مستويات ذكاء عالية للغاية تتوسّع نحو الخارج في الكون بسرعة الضوء». وفي حين أنّه من المفترض أن تقتصر

التوقّعات الغريبة والمتطرّفة على عوالم الخيال العلمي، إلّا أنّه ثمّة أمثلة على التقدّم التكنولوجي الذي حقّق بالفعل نموّاً أسّياً على مدى فترات طويلة.

يُعتبر قانون مور - أي الملاحظة التي تشير إلى أنّ عدد المكوّنات في دوائر الكمبيوتر يتضاعف كلّ عامين كما يبدو - مثالاً جيّداً على النموّ الأسّي للتكنولوجيا. فخلافاً لقوانين الحركة لدى نيوتن، لا يعدّ قانون مور قانوناً فيزيائياً أو طبيعياً، ولذلك ما من سبب للافتراض أنّه سيظلّ قائماً إلى الأبد. مع ذلك، ظلّ القانون متماسكاً خلال الفترة الممتدّة بين عامي 1970 و2016. وفي الواقع، يقترن قانون مور بالتسارع الأوسع للتكنولوجيا الرقمية، التي ساهمت بدورها بشكل كبير في النموّ الاقتصادي في السنوات القريبة من نهاية القرن الماضي.

في عام 1990، عندما أخذ العلماء على عاتقهم رسم خارطة الثلاثة مليارات حرف التي تكوّن الجينوم البشري، سخر النقّاد من حجم المشروع، ملمحين إلى أنّ إكماله سيستغرق آلاف السنين بالمعدّل الحالي. غير أنّ تقنيّة التسلسل تحسّنت بوتيرة أسّية. فتمّ تسليم «كتاب الحياة» الكامل في عام 2003، قبل الموعد المحدّد، وضمن الميزانية البالغة مليار دولار[22]. واليوم، يستغرق تفصيل سلسلة الشفرة الوراثية لأحد الأشخاص أقلّ من ساعة ويكلّف ما دون ألف دولار.

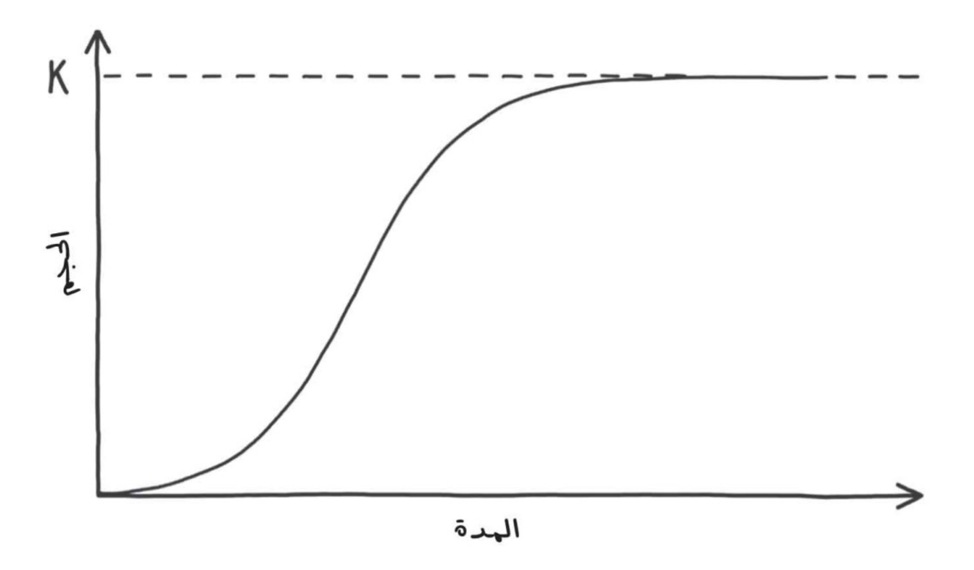
الانفجار السكاني

توضح قصّة الطحالب في البحيرة أنّ فشلنا في التفكير الأسّي قد يتسبّب بانهيار النظم البيئية والسكّان. ومن الأنواع المهدّدة بالانقراض، على الرغم من نواقيس الخطر التي تُقرع باستمرار، نوعنا بالطبع.

بين عامي 1346 و1353، اجتاح «الموت الأسود»، أحد أكثر الأوبئة المدمّرة في تاريخ البشرية (سنبحث موضوع انتشار الأمراض المعدية بمزيد من التفصيل في الفصل 7)، أوروبا، وقضى على 60% من سكّانها. فانخفض عدد سكّان العالم نتيجة ذلك إلى نحو 370 مليون نسمة. منذ ذلك الحين، ازداد عدد سكّان العالم باستمرار ومن دون توقّف. وبحلول عام 1800، بلغ عدد سكّان العالم المليار الأوّل تقريباً. فدفعت الزيادة السكّانية السريعة في ذلك الوقت عالِم الرياضيّات الإنكليزي، توماس مالتوس، إلى الإشارة إلى أنّ عدد السكان ينمو بمعدّل يتناسب مع حجمه الحالي[23]. وكما هو الحال مع خلايا الجنين في أيّامه الأولى، أو الأموال التي تُترك على حالها في حساب مصرفي، تشير هذه القاعدة البسيطة إلى حدوث نموّ أسّي للسكّان على كوكب مزدحم أساساً.

من القصص المفضّلة للعديد من روايات وأفلام الخيال العلمي (مثل الأفلام الشهيرة، *Blockbusters*، *Interstellar*، و*Passengers*)، حلّ مشاكل تزايد سكّان العالم من خلال استكشاف الفضاء. وعادةً، يتمّ اكتشاف كوكب مناسب يشبه الأرض ويبدأ إعداده لسكن الجنس البشري الذي ضاق به كوكبنا. بعيداً عن الخيال العلمي البحت، أيّد العالم البارز ستيفن هوكينغ في عام 2017 اقتراح استعمار الفضاء. وحذّر من أنّ على البشر أن يبدأوا بمغادرة الأرض خلال الثلاثين عاماً القادمة، من أجل استعمار المرّيخ أو القمر، إذا كان جنسنا ينوي النجاة من خطر الانقراض الناجم عن الاكتظاظ السكّاني وتغيّر المناخ المرتبط به. لكن مع الأسف، إذا واصلنا نموّنا الجامح، فإنّ شحن نصف سكّان الأرض إلى كوكب جديد يشبه الأرض لن يُكسبنا سوى 63 سنة أخرى قبل أن يتضاعف عدد السكّان مجدّداً ويبلغ كلا الكوكبان نقطة التشبّع. توقّع مالتوس أن يجعل النموّ الأسّي فكرة استعمار الكواكب عديمة الجدوى حين كتب يقول[24]: «إنّ جراثيم الوجود الموجودة في هذه البقعة من الأرض، مع وفرة من الغذاء، ومساحة واسعة للتوسّع، سوف تملأ ملايين العوالم خلال بضعة آلاف من السنين».

مع ذلك، وكما سبق واكتشفنا (تذكّر مثال البكتيريا العقدية البرازية التي تنمو في زجاجة الحليب في بداية هذا الفصل)، فإنّ النموّ الأسّي لا يمكن أن يستمرّ إلى الأبد. فعادة، كلّما ازداد عدد السكان، تصبح الموارد البيئية التي تدعمهم موزّعة بكمّيات أقلّ، وينخفض معدّل النموّ الصافي (أي الفرق بين معدّل المواليد ومعدّل الوفيات) بشكل طبيعي. ويقال إنّ للبيئة «قدرة استيعابية» لنوع معيّن - أي حدّ أقصى طبيعي مستدام لأعداده. وقد أقرّ داروين أنّ القيود البيئية ستؤدّي إلى «صراع من أجل الوجود»، مع تنافس الأفراد على أماكنهم في اقتصاد الطبيعة». ويُعرف أبسط نموذج رياضي لوصف آثار المنافسة على الموارد المحدودة، ضمن الأنواع أو في ما بينها، باسم نموذج النموّ اللوجستي.



الشكل 3: يزداد منحنى النموّ اللوجستي بشكل أسّي تقريباً في البداية، ولكنّ النموّ يتباطأ بعد ذلك إذ تصبح الموارد عاملاً مقيِّداً، وتوشك أعداد النوع على بلوغ القدرة الاستيعابية، K.

في الشكل 3، يبدو النموّ اللوجستي أسّياً في البداية، مع نموّ عدد السكّان بحرّية بما يتناسب مع حجمه الحالي، من دون أن تقيّده المخاوف البيئية. لكن كلّما ازداد عدد السكّان، تجعل ندرة الموارد معدّلَ الوفيات أقرب إلى معدّل المواليد. فينخفض معدّل النموّ السكّاني الصافي في نهاية المطاف إلى الصفر، وفيه تحلّ الولادات الجديدة بين السكّان محلّ الوفيات لا أكثر، ما يعني أنّ الأعداد تستقرّ عند القدرة الاستيعابية. كان العالم الاسكتلندي أندرسون مكيندريك (أحد أوائل علماء الأحياء الرياضيين، الذي سنتعرّف عليه أكثر في الفصل 7 في سياق عمله على نمذجة انتشار الأمراض المعدية) أوّل من أثبت أنّ النموّ اللوجستي حدث في المجموعات البكتيرية[25]. ومنذ ذلك الحين، تبيّن أنّ النموذج اللوجستي يمثِّل بشكل ممتاز أعداد النوع الذي يتمّ إدخاله في بيئة جديدة، إذ يسجّل نموّ أعداد حيوانات متنوّعة مثل الأغنام[26]، والفقمة[27]، والغرنوق[28].

تبقى القدرة الاستيعابية للعديد من الأنواع الحيوانية ثابتة تقريباً، لأنّها تعتمد على الموارد المتاحة في بيئاتها. أمّا بالنسبة إلى البشر، فثمّة مجموعة متنوّعة من العوامل، من بينها الثورة الصناعية ومكننة الزراعة والثورة الخضراء، التي ساعدت جنسنا على الاستمرار في زيادة قدرته الاستيعابية. وعلى الرغم من اختلاف التقديرات الحالية للحدّ الأقصى لعدد السكّان المستدام على سطح الأرض، تشير العديد من الأرقام إلى أنّه يتراوح بين 9 إلى 10 مليارات شخص. ويعتقد عالم الاجتماع الأحيائي البارز، إ. ويلسون، بوجود قيود قويّة ومتأصّلة على أعداد البشر التي يمكن للغلاف الحيوي للأرض دعمها[29]. تشمل هذه القيود: توافر المياه العذبة والوقود الأحفوري وغيرها

من الموارد غير المتجدّدة، فضلاً عن الظروف البيئية (بما في ذلك، وعلى الأخصّ، تغيّر المناخ)، ومساحة العيش. ويُعتبر توافر الغذاء من العوامل الأكثر شيوعاً. إذ يقدّر ويلسون أنّه حتّى لو أصبح جميع الناس نباتيين، وتناولوا الطعام المنتج مباشرة بدلاً من إطعامه للماشية (لأنّ أكل لحوم الحيوانات يعدّ وسيلة غير فاعلة لتحويل الطاقة النباتية إلى طاقة غذائية)، فإنّ المساحة الحالية البالغة 1.4 مليار هكتار من الأراضي الصالحة للزراعة لن تُنتِج إلّا ما يكفي من الغذاء لدعم 10 مليارات شخص[30].

إذا استمرّ عدد السكّان (نحو سبعة مليارات ونصف مليار نسمة) بالنموّ بمعدّله الحالي البالغ 1.1% سنويّاً، فإنّنا سنصل إلى 10 مليارات شخص خلال 30 سنة. وقد عبّر مالثوس عن مخاوفه من الزيادة السكّانية في عام 1798، عندما حذّر قائلاً: «إنّ قوّة السكّان تفوق بكثير قدرة الأرض على إنتاج الغذاء للإنسان، بحيث إنّ الموت المبكر سيزور الجنس البشري حتماً بشكل أو بآخر». وفي سياق تاريخ البشرية، نحن الآن في اليوم الأخير المتبقّي لإنقاذ البحيرة.

مع ذلك، تبقى لدينا مساحة للتفاؤل. فعلى الرغم من أنّ عدد السكّان لا يزال في ازدياد، إلّا أنّ التحديد الفاعل للنسل وانخفاض معدّل وفيات الرضّع (ممّا يؤدّي إلى انخفاض معدّلات التكاثر) جعلا الزيادة تحدث بمعدّل أبطأ من الأجيال السابقة. فقد بلغ معدّل النموّ ذروته، أي نحو 2% سنوياً، في أواخر الستّينيات، ولكن من المتوقّع أن ينخفض إلى ما دون 1% سنوياً بحلول عام 2023 [31]. بالتالي، لو بقيت معدّلات النموّ كما كانت عليه في الستّينيات، لكنّا استغرقنا 35 عاماً فقط لمضاعفة حجم السكّان. غير أنّنا في الواقع بلغنا 7.3 مليار (أي ضعف عدد سكّان العالم البالغ 3.15 مليار عام 1969) في عام 2016، أي بعد نحو 50 عاماً. وبمعدّل نموّ 1% فقط في السنة، يمكننا أن نتوقّع ازدياد المدّة إلى 69.7 عاماً، أي ما يقرب من ضعف المدّة المقدّرة وفقاً لمعدلات عام 1969. ذلك أنّ انخفاضاً طفيفاً في معدل الزيادة يُحدث فرقاً هائلاً عندما يتعلّق الأمر بالنموّ الأسّي. ويبدو أنّنا، من خلال إبطاء النموّ السكّاني ونحن نتّجه نحو القدرة الاستيعابية للكوكب، فإنّنا نكسب طبيعياً مزيداً من الوقت. مع ذلك، ثمّة أسباب تبيّن كيف يجعلنا السلوك الأسّي، كأفراد، نشعر أنّنا نملك وقتاً أقلّ ممّا نعتقد.

يمرّ الوقت بسرعة وأنت تكبر

هل تتذكّر، عندما كنتَ أصغر سنّاً، أنّ العطلة الصيفية كانت تبدو وكأنّها دهر؟ بالنسبة إلى ولدَيّ اللذين يبلغان الرابعة والسادسة، تبدو الفترة الفاصلة بين الأعياد طويلة جدّاً. في المقابل، مع تقدّمي في السنّ، يبدو لي الوقت أنّه يمرّ بوتيرة مقلقة، بحيث تتحوّل الأيّام إلى أسابيع ومن ثمّ إلى شهور، وتختفي كلّها في حفرة الماضي التي لا قرار لها. عندما أدردش أسبوعياً مع والديّ

السبعينيَين، أشعر أنّهما يملكان بالكاد الوقت للردّ على مكالمتي، بسبب انشغالهما الشديد بالأنشطة الأخرى التي يزدحم بها جدولهما. لكن عندما أسألهما كيف أمضيا الأسبوع، غالباً ما أشعر أنّ مشاغلهما المستمرّة لا تملأ سوى يوماً واحداً من أيّامي. ولكن، ماذا أعرف أنا عن ضغوط الوقت، فأنا لا أملك سوى طفلين، ووظيفة بدوام كامل، وكتاباً أؤلّفه.

لا يجدر بي أن أكون لاذعاً مع والديّ، لأنّ الوقت الملحوظ يمرّ بالفعل بسرعة أكبر مع تقدّمنا في السنّ، مغذّياً إحساسنا المتزايد بقلّة الوقت المثقل بالأعباء[32]. ففي تجربة أجريت في عام 1996، طُلب من مجموعة من الشباب (19-24) ومجموعة من كبار السنّ (60-80) عدّ ثلاث دقائق في أذهانهم. في المتوسط، سجّلت المجموعة الأصغر سنّاً ثلاث دقائق وثلاث ثوانٍ من الوقت الفعلي، على نحو دقيق تقريباً، بينما لم تتوقّف المجموعة الأكبر سنّاً قبل ثلاث دقائق و40 ثانية، في المتوسّط[33]. وفي تجارب أخرى ذات صلة، طُلب من المشاركين تقدير طول فترة زمنية محدّدة قاموا خلالها بمهمّة[34]. فأعطى المشاركون الأكبر سنّاً بشكل ثابت تقديرات أقصر لطول الفترة الزمنية مقارنة بالمجموعات الأصغر سنّاً. على سبيل المثال، عند انقضاء دقيقتين من الوقت الفعلي، كان أفراد المجموعة الأكبر سنّاً، في المتوسّط، قد سجّلوا أقلّ من 50 ثانية فقط في أذهانهم، ممّا دفعهم إلى التساؤل أين ذهبت الثواني العشر المتبقّية.

هذا التسارع في إدراكنا لمرور الوقت لا علاقة له بانقضاء أيّام الشباب الخالية من الهموم وامتلاء جداولنا بمسؤوليّات الكبار. في الواقع، ثمّة عدد من الأفكار المتنافسة التي تفسّر سبب تسارع تصوّرنا للوقت مع تقدّمنا في السنّ. ترتبط إحدى النظريّات بحقيقة تباطؤ عمليّة الأيض مع العمر، على نحو يتماشى مع تباطؤ ضربات القلب والتنفّس[35]. فكما هو الحال مع ساعة التوقيت التي يتمّ ضبطها لتتحرّك بسرعة، تتكّ هذه «الساعات البيولوجية» بسرعة أكبر لدى الأطفال. وخلال فترة زمنية محدّدة، تنبض هذه الأجهزة البيولوجية الضابطة للسرعة (كالأنفاس أو نبضات القلب) أكثر، ممّا يجعلهم يشعرون أنّ فترة زمنية أطول قد انقضت.

تشير النظرية المنافِسة أنّ إدراكنا لمرور الزمن يعتمد على كمّية المعلومات الإدراكية الجديدة التي نتعرّض لها من بيئتنا[36]. فكلّما ازدادت المحفّزات الجديدة، استغرقت أدمغتنا وقتاً أطول لمعالجة المعلومات. وتبدو الفترة الزمنية المقابلة، على الأقلّ في وقت لاحق، أنّها تدوم لفترة أطول. يمكن استخدام هذه الحجّة لتوضيح التصوّر الشبيه بالأفلام للأحداث التي تُعرض بحركة بطيئة في اللحظات التي تسبق وقوع حادث مباشرة. إذ يكون الوضع بالنسبة إلى ضحيّة الحادث في هذه السيناريوهات غير مألوف على الإطلاق بحيث تكون كمّية المعلومات الإدراكية الجديدة ضخمة في

المقابل. وربّما، ليس الوقت هو الذي تباطأ فعليّاً خلال الحدث، بل تذكّرنا للأحداث في وقت لاحق، مع تسجيل دماغنا ذكريات أكثر تفصيلاً استناداً إلى فيض البيانات التي اختبرها. وقد أثبتت صحّة ذلك التجارب التي أجريت على أشخاص عاشوا إحساس السقوط الحرّ غير المألوف[37].

ترتبط هذه النظريّة تماماً بتسارع الوقت الملحوظ. فمع تقدّمنا في العمر، نميل إلى أن نكون أكثر دراية ببيئتنا وبتجارب الحياة بشكل عام. في الماضي، كانت رحلاتنا اليومية تبدو في الأساس أطول وأكثر صعوبة، تملؤها المشاهد الجديدة وفرص الانعطافات الخاطئة. أمّا اليوم، فهي تنقضي كالبرق ونحن نعبر طرقاتها المألوفة بشكل آلي.

الأمر مختلف بالنسبة إلى الأطفال. إذ غالباً ما تكون عوالمهم أماكن مليئة بالمفاجآت والتجارب غير المألوفة. يعيد الصغار باستمرار تكوين نماذجهم عن العالم من حولهم، الأمر الذي يتطلّب مجهوداً ذهنياً ويبدو أنّه يجعل الرمال تجري ببطء أكبر عبر ساعاتهم الرملية مقارنة بالكبار المقيّدين بالروتين. وكلّما ازدادت معرفتنا بروتين الحياة اليومية، تسارع إدراكنا لمرور الوقت، ومع تقدّمنا في العمر، ازداد هذا الاعتياد. بناء على هذه النظرية، لجعل الوقت يدوم أطول، يجب أن نملأ حياتنا بتجارب جديدة ومتنوّعة، ونتجنّب الروتين اليومي الذي يهدر الوقت.

لا يمكن لأيّ من الأفكار المذكورة أعلاه شرح المعدّل المنتظم تقريباً لتسارع تصوّرنا للوقت. إذا بدا طول فترة زمنية محدّدة أنّه يتناقص باستمرار مع تقدّمنا في العمر، فإنّ ذلك يشير إلى «مقياس أسّي» للوقت. نحن نستخدم المقاييس الأسّية بدلاً من المقاييس الخطّية التقليدية عند قياس الكمّيات التي تختلف باختلاف مجموعة كبيرة من القيم المختلفة. والأمثلة الأكثر شهرة على ذلك هي مقاييس موجات الطاقة مثل الصوت (يقاس بالديسيبل) أو النشاط الزلزالي. فعلى مقياس ريختر الأسّي (للزلازل)، تتوافق الزيادة من درجة 10 إلى درجة 11 مع زيادة بمقدار عشرة أضعاف في حركة الأرض، بدلاً من زيادة بنسبة 10% كما يحدث على المقياس الخطّي. هكذا، تمكّن مقياس ريختر من تسجيل الهزّة المنخفضة في مدينة مكسيكو في يونيو 2018 عندما احتفل مشجّعو كرة القدم المكسيكية في المدينة بهدفهم ضدّ ألمانيا في مباريات كأس العالم. وفي المقابل، سجّل المقياس زلزال فالديفيا عام 1960 في تشيلي. إذ أطلق الزلزال الذي بلغت قوّته 9.6 طاقة تعادل أكثر من ربع مليون من القنابل الذرّية التي سقطت على هيروشيما.

إذا تمّ الحكم على طول فترة من الزمن بما يتناسب مع الوقت الذي عشناه أساساً، فإنّ النموذج الأسّي للوقت الملحوظ يكون منطقياً. بوصفي ابن 34 عاماً، تمثّل السنة أقلّ من 3% من حياتي فقط. ويبدو أنّ أعياد ميلادي تتعاقب بسرعة زائدة هذه الأيّام. لكن بالنسبة إلى ابن 10

سنوات، فإنّ انتظار 10% من حياته لجولة الهدايا القادمة يتطلّب صبراً طويلاً. بالنسبة لابني البالغ أربع سنوات من العمر، فإنّ فكرة الاضطرار إلى انتظار مرور ربع حياته حتّى يحتفل بعيد ميلاده القادم هو أمر يصعب احتماله. في ظل هذا النموذج الأسّي، فإنّ الزيادة النسبية في العمر التي يمرّ بها ابن أربع سنوات بين أعياد ميلاده تعادل انتظار ابن الأربعين بلوغه سنّ الخمسين. عند النظر إلى المسألة من هذه الزاوية النسبية، يصبح من المنطقي أن يبدو لنا أنّ الوقت يتسارع مع تقدّمنا في العمر.

ليس من غير المألوف بالنسبة إلينا أن نصنّف حياتنا في عقود - عشرينياتنا الخالية من الهموم، وثلاثينياتنا الجادّة، وهكذا دواليك - ممّا يشير إلى أنّ كلّ فترة زمنية تحظى بوزن متساوٍ. مع ذلك، إذا بدا الوقت فعلاً أنّه يتسارع بشكل أسّي، فإنّ فصول حياتنا التي تمتدّ على فترات زمنية مختلفة قد تبدو أنّها بنفس المدّة. وعلى أساس النموذج الأسّي، قد تبدو الأعمار من 5 إلى 10، 10 إلى 20، 20 إلى 40 وحتّى 40 إلى 80 جميعها متساوية في الطول (أو القِصَر). ولست أسعى إلى استباق التسجيل المحموم لكثير من قوائم دلاء المياه الجليدية، ولكن في ظلّ هذا النموذج، قد تمضي الأربعون عاماً الممتدّة بين سنّ الأربعين والثمانين، والتي تشمل جزءاً كبيراً من سنّ الكهولة والشيخوخة، بالسرعة التي تنقضي فيها السنوات الخمس الفاصلة بين سنَّي الخامسة والعاشرة.

* * *

ينبغي أن يشكّل ذلك تعويضاً صغيراً إذاً، بالنسبة إلى المتقاعدتين فوكس وتشالمرز، المحكوم عليهما بالسجن بسبب مخطّط العطاء المتبادل الهرمي. فتبدو مدّة عقوبتهما وكأنّها تنقضي بسرعة كبيرة نتيجة روتين حياة السجن، أو مجرّد المرور المتصاعد أسّياً للوقت الملحوظ.

في المجموع، تمّ الحكم على تسع نساء بسبب دورهنّ في المخطّط. ومع أنّ البعض أُجبرن على سداد جزء من الأموال التي جمعنها خلال إدارتهنّ للمشروع، إلّا أنّه لم يتمّ استرداد سوى جزء ضئيل جدّاً من ملايين الجنيهات المستثمرة في هذا المخطّط. ولم تصل أيّ من هذه الأموال إلى المستثمرين المخدوعين، أولئك الضحايا الذين فقدوا كلّ شيء لأنّهم أساؤوا تقدير قوّة النمو الأسّي.

من انفجار المُفاعل النووي إلى الانفجار السكّاني، ومن انتشار الفيروس إلى حملة التسويق الفيروسي، يمكن للنموّ والاضمحلال الأسّيَين أن يؤدّيا دوراً خفياً وحاسماً في كثير من الأحيان، في حياة الناس العاديين مثلي ومثلك. وقد أدّى استغلال السلوك الأسّي إلى ظهور فروع علمية يمكنها إدانة المجرمين وغيرهم ممّن يمكنهم الآن، فعليّاً، تدمير العالم. أمّا عند إغفال التفكير الأسّي، فقد

يكون لقراراتنا، مثل سلسلة التفاعلات النووية غير المضبوطة، عواقب غير متوقّعة وبعيدة المدى على نحو أسّي. ومن بين الابتكارات الأخرى، تسارعت وتيرة التقدّم التكنولوجي الهائل في مجال الطبّ الشخصي، وفيه يمكن لأيّ شخص تفصيل سلسلة حمضه النووي مقابل مبلغ متواضع نسبيّاً. ومن شأن ثورة الجينوم هذه منحنا قدرة غير مسبوقة على الاطّلاع على سماتنا الصحّية، ولكن هذا فقط إذا استطاعت الرياضيّات التي تدعم الطبّ الحديث مواكبة ذلك، كما سنبحث في الفصل التالي.

2

الحساسية، والنوعية، والآراء الثانية: أهمّية الطبّ في ضوء الرياضيّات

عندما رأيت الرسالة الإلكترونية في صندوق الوارد لديّ، شعرت على الفور بموجة من الأدرينالين، بدأت في معدتي، وانتقلت عبر ذراعيّ، مسبّبة وخزاً في أصابعي. شعرت بنبض خلف أذنيّ وأنا أمسك أنفاسي لا شعورياً. فتحت الرسالة، وتخطّيت المقدّمة، ثمّ ضغطتُ على الفور على رابط «عرض تقاريرك». فُتحت نافذة متصفّح، فسجّلت الدخول ونقرت على القسم المعنون «مخاطر الصحّة الجينية». وبينما رحت أقرأ القائمة بسرعة، شعرت بالارتياح لدى رؤية الجملة التالية: «مرض الشلل الرعاشي: لم يتمّ اكتشاف المتغيّرات»، «جينات سرطان الثدي /BRCA1 BRCA2: لم يتمّ اكتشاف المتغيّرات»، «التنكّس البقعي المرتبط بالسنّ: لم يتم اكتشاف المتغيّرات». بدأ قلقي يخبو وأنا أقرأ أسماء مزيد من الأمراض التي لم أكن مهيّأً لها وراثياً. وعندما وصلتُ إلى أسفل القائمة، عادت عيناي مجدّداً إلى مرض فاتني: «مرض ألزهايمر المتأخّر: خطر مرتفع».

عندما بدأت بتأليف هذا الكتاب، اعتقدت أنّه سيكون من المثير للاهتمام دراسة الرياضيّات الكامنة وراء الاختبارات الوراثية التي يتمّ إجراؤها في المنزل. فقمت بالتسجيل لدى 23andMe، وهم على الأرجح أشهر شركة تعمل في مجال علم الجينوم الشخصي. فهل من طريقة أفضل لفهم هذه النتائج من إجراء الاختبار بنفسي؟ مقابل رسم بسيط، أرسلوا إليّ أنبوباً لأخذ مليمترين من اللعاب، أغلقته وأرسلته إليهم. وعدَت الشركة بإعطائي أكثر من 90 تقريراً عن السمات الخاصّة بي، وعن صحّتي، وحتّى معلومات عن أسلافي. وخلال الأشهر القليلة التالية، لم أفكّر كثيراً في الأمر، ولم أعتقد حقّاً أنّني سأحصل على معلومات مهمّة. لكن عندما وصلت الرسالة الإلكترونية، أدركت فجأة أنّ معلومات شاملة عن صحّتي في المستقبل موجودة على بعد بضع نقرات. هكذا جلست أمام شاشتي، أواجه ما بدا أنّه تداعيات صحّية خطيرة.

لكي أفهم بشكل أفضل ما تعنيه عبارة «ارتفاع الخطر»، قمت بتنزيل التقرير الكامل المكوّن من 14 صفحة حول احتمال إصابتي بمرض ألزهايمر. لم تكن لديّ آنذاك سوى معرفة سطحية بهذا

المرض، وأردت اكتشاف المزيد. غير أنّ الجملة الأولى من التقرير لم تساعد كثيراً على التخفيف من قلقي: «يتميّز مرض ألزهايمر بفقدان للذاكرة، وتراجع معرفي، وتغييرات في الشخصية». وبينما كنت أقرأ، وجدت أنّ andMe23 اكتشفت وجود المتغيّرة إيبسيلون-4 (ε4) في إحدى نسختين من المورّثة *Apolipoprotein E* (APOE). كشفت لي أوّل معلومة كمّية في التقرير أنّه «... في المتوسّط، لدى الرجل من أصل أوروبي الذي يحمل هذه المتغيّرة احتمال بنسبة 4-7% للإصابة بمرض ألزهايمر المتأخّر في سنّ 75، ويرتفع هذا الاحتمال إلى 20-23% في سنّ 85».

على الرغم من أنّ هذه الأرقام كانت تعني شيئاً ما بطريقة مجرّدة، إلّا أنّني وجدت صعوبة في تحليلها. فقد أردت معرفة ثلاثة أشياء حقّاً. أوّلاً، ما الذي يمكنني فعله حيال المأزق الجديد الذي وجدتُ نفسي فيه؟ ثانياً، ما مدى سوء حالتي مقارنةً بشخص عادي آخر؟ وأخيراً، كم يمكنني الوثوق بالأرقام التي زوّدتني بها andMe23؟ وبينما كنت أتابع القراءة، أجابت المعلومة التالية على سؤالي الأوّل: «ما من علاج معروف أو سُبل للوقاية من مرض ألزهايمر». أمّا للإجابة عن أسئلتي الأخرى، فكان عليّ التعمّق في التقرير. هكذا أصبح اهتمامي بالتفسير الرياضي لاختبارات الوراثة أكثر إلحاحاً فجأة، كما بات يعنيني شخصيّاً.

* * *

مع تحوّل الطبّ إلى تخصص كمّي تدريجياً، غالباً ما توفّر الصيغ الرياضية الأساس النزيه للقرارات الرئيسة، سواء تعلّق ذلك بتوافر علاج معيّن أو، على مستوى شخصي أكثر، بخياراتنا الحياتية. سوف نستكشف هذه الصيغ في الفصل التالي، لمعرفة ما إذا كانت ذات أساس متين في العلوم أم مجرّد علم أعداد عفا عليه الزمن، ومن الأجدى تجاهله. ومن المفارقات أنّنا سنستعين بالرياضيّات التي تعود إلى قرون من الزمن لاقتراح بدائل أكثر دقّة.

مع تقدّم تكنولوجيا التشخيص، فإنّنا نخضع للتقييمات الطبّية أكثر من أيّ وقت مضى. لذلك سنبحث في الآثار المفاجئة للنتائج الإيجابية الخاطئة التي تعطيها برامج الفحص الطبّي الأكثر انتشاراً، وسنتعرّف كيف يمكن للاختبارات أن تكون بالغة الدقّة وغير دقيقة إطلاقاً في الوقت نفسه. سنواجه المعضلات التي تطرحها أدوات مثل اختبارات الحمل، التي تخطئ في النتائج الإيجابية والسلبية على السواء، ونرى كيف يمكن استخدام هذه النتائج غير الصحيحة في سياقات تشخيصية مختلفة.

لقد أدخلَنا تسلسل الجينوم الكامل، والتكنولوجيا القابلة للارتداء، والتطوّر في علم البيانات عهدَ الطبّ الشخصي. وبينما نحن نتّخذ خطواتنا الأولى في هذا العصر الجديد للرعاية الصحّية،

سأعيد تفسير نتائج فحص حمضي النووي من أجل فهم المخاطر الصحّية التي تتهدّدني، وتحديد ما إذا كانت المنهجيّة الرياضية المستخدمة حاليّاً لتفسير الاختبارات الوراثية المخصّصة دقيقة فعلاً.

ما هي الاحتمالات؟

في عام 2007، أصبحت 23andMe، التي سمّيت باسم الـ 23 زوجاً من الكروموسومات التي تضمّ الحمض النووي البشري النموذجي، أوّل شركة تجري اختبار الحمض النووي الشخصي لأغراض تحديد أصول الشخص. في العام التالي، وبفضل استثمار من شركة غوغل بقيمة 4 ملايين دولار، قاموا بتسويق اختبار لعاب يمكن من خلاله تقدير مدى احتمال تعرّض المرء للإصابة بنحو 100 حالة مَرضية مختلفة، بدءاً من عدم احتمال الكحول، ووصولاً إلى الرجفان الأذيني. وكانت قائمة السمات شاملة والنتائج ذات قوّة تحويلية هائلة إلى حدّ أنّ مجلّة *التايم* وصفت الاختبار أنّه «اختراع العام».

لكنّ فرحة 23andMe لم تدم طويلاً. ففي عام 2010، قامت إدارة الغذاء والدواء الأميركية (FDA) بإبلاغ شركة الجينوم الشخصي تلك بأنّ اختباراتها تدخل في إطار الوسائل الطبّية وتتطلّب بالتالي موافقة فيدرالية. في عام 2013، كانت الشركة لا تزال تفتقر إلى هذه الموافقة، فما كان من إدارة الغذاء والدواء إلّا أن أمرتها بالتوقّف عن إعطاء عوامل خطر الإصابة بالأمراض حتّى يتمّ التحقّق من دقّة اختباراتها. فرفع عملاء شركة 23andMe دعوى قضائية جماعية، زاعمين أنّهم قد ضُلِّلوا بشأن ما يمكن لشركة المعلومات الشخصية تقديمه. وفي ذروة هذه المشاكل، في ديسمبر 2014، أطلقت 23andMe خدمات متعلّقة بالصحّة في المملكة المتّحدة. بالنظر إلى الخلافات، تساءلتُ عن مدى دقّة الاختبارات التي قد يتمّ إجراؤها على حمضي النووي إذا أرسلتُ لهم عيّنة.

قرأتُ عن تجربة مات فيندر، مطوّر شبكات يبلغ من العمر 33 عاماً، في صحيفة *نيويورك تايمز*، غير أنّ ذلك لم يبدّد مخاوفي. بصفته شخصاً غير اجتماعي باعترافه شخصياً، وعضواً في مجتمع «الأصحاء القلقين» المتعاظم، فإنّه عميل مثالي لشركة 23andMe. بعد أن استلم فيندر بيانات ملفّه الشخصي وعرضها على طرف ثالث ليشرح له محتواها، اكتشف أنّه يعاني من طفرة في مورّثة تحمل اسم PSEN1. تُعتبر هذه المورّثة مؤشراً على ظهور مرض ألزهايمر المبكر مع «تغلغل كامل»، ما يعني أنّ كلّ من يملك هذه الطفرة يصاب بالمرض، من دون استثناء. بالطبع، شعر فيندر بالقلق من فكرة فقدان قدرته على التفكير بصورة مجرّدة، وحلّ المشاكل، واستعادة

الذكريات بشكل متماسك. فقد خفّض هذا التشخيص متوسّط عمره المتوقّع البنّاء بما لا يقلّ عن 30 عاماً.

شغل الموضوع بال فيندر وراح يسعى إلى الطمأنينة. وبما أنّه لا يملك تاريخاً عائلياً لمرض الزهايمر، فقد واجه صعوبة في إقناع علماء الوراثة بطلب اختبار متابعة لتأكيد تلك النتيجة. وعوضاً عن ذلك، لجأ إلى إجراء اختبار وراثي ثانٍ بنفسه. فأرسل عيّنة لعاب أخرى إلى Ancestry.com هذه المرّة، وانتظر النتائج. أتاه الجواب بعد خمسة أسابيع، وكانت النتيجة سلبية بالنسبة إلى المورّثة PSEN1. فشعر بالارتياح إلى حدّ ما، لكنّه بات أكثر حيرة من ذي قبل، وتمكّن أخيراً من إقناع الطبيب بمنحه تقييماً سريرياً، أكّد النتيجة السلبية التي وردته من Ancestry.com.

تبدو تقنية التسلسل المستخدمة من قبل 23andMe وAncestry.com، مع معدّل خطأ لا يتعدّى 0.1%، موثوقة للغاية. مع ذلك، عند اختبار ما يقرب من مليون متغيّرة وراثية، لا بدّ لنا أن نتذكّر أنّه حتّى مع معدّل الخطأ المتدنّي هذا، يجب توقّع نحو 1000 خطأ. وقد يكون مقلقاً، لكنّه ليس مستغرباً، وجود اختلاف بين نتائج شركتين مستقلّتين. وربّما الأكثر إثارة للقلق هو الانعدام الواضح للمساعدة بعد ظهور النتائج. إذ يُترَك المرضى الذين حصلوا على بصماتهم الوراثية للتعامل مع نتائجهم في عزلة طبّية كاملة تقريباً.

بعد حصول 23andMe تدريجياً على موافقة إدارة الغذاء والدواء على مجموعة مخفَّضة جدّاً من الاختبارات الوراثية، أعادت الشركة إطلاق نشاطها في الولايات المتّحدة في عام 2017، وأصبحت مجموعة أدوات اختبار الحمض النووي في المنزل واحدة من أكثر منتجات أمازون مبيعاً في يوم بلاك فرايداي من ذلك العام. هكذا، وعلى الرغم من مخاوفي (أو ربّما بسببها)، طلبتُ إجراء فحص وأرسلتُ عيّنة لعاب لاختبارها.

في كلّ خلية تقريباً من خلايا الجسم البشري، توجد نواة تحتوي على نسخة من الحمض النووي الخاصّ بنا، أو ما يسمّى بـ «كتاب الحياة». نرث هذه السلالم الطويلة والملتوية من النوكليوتيدات في 23 زوجاً من الكروموسومات، التي يأتي واحد منها من كلّ من والدَينا. ويحتوي كلّ كروموسوم في كلّ زوج على نسخ من المورّثات نفسها التي يحتويها شريكه، الذي يتشابه لديه التسلسل، لكنّه ليس نفسه بالضرورة. على سبيل المثال، ثمّة متغيّرتان رئيستان من المورّثة APOE المرتبطة بمرض ألزهايمر تُجري 23andMe اختباراً عليهما، وهما ε3 وε4. تقترن المتغيّرة ε4 بزيادة خطر الإصابة بمرض ألزهايمر المتأخّر. ونظراً لوجود كروموسومين اثنين، يمكن أن يكون

لدى الشخص نسخة واحدة من ε4 (ونسخة واحدة من ε3) أو نسختين من ε4 (بدون أيّ نسخة من ε3) أو نسختين من ε3 (بدون أيّ نسخة من ε4) - يعرف عدد النسخ باسم التركيب الوراثي. وتعتبر النسختان من ε3 النمط الوراثي الأكثر شيوعاً والأساس الذي يتمّ عليه الحكم على احتمال الإصابة بمرض ألزهايمر. وكلّما ازداد عدد نسخ ε4 لدى المرء، ارتفع خطر الإصابة بمرض ألزهايمر.

ولكن متى يكون الاحتمال عالياً؟ بما أنّ 23andMe وجدَت لديّ نوعاً وراثياً معيّناً، فما هو «الخطر المتوقّع» لديّ - أي احتمال الإصابة بالمرض؟ لكي أكون واثقاً من المخاطر التي توقّعوها بالنسبة إليّ، كان عليّ التأكد من أنّ تحليلهم الرياضي مبنيّ على أساس متين قبل القفز إلى أيّ استنتاجات.

* * *

تتمثّل أفضل طريقة لتقدير الخطر المتوقّع للإصابة بمرض ألزهايمر في اختيار عدد كبير جدّاً من الأفراد، يمثّل السكّان بشكل عامّ، والتأكّد من تركيبهم الوراثي، ومن ثمّ فحصهم بانتظام لمعرفة من يصاب بمرض ألزهايمر. باستخدام هذه البيانات التمثيلية، سيكون من السهل مقارنة خطر الإصابة بمرض ألزهايمر في ظلّ نوع وراثي معيّن بخطره لدى عموم السكّان - أي ما يسمّى «الخطر النسبي». غير أنّ هذا النوع من الدراسات الطولية غالباً ما يكون باهظ التكلفة نظراً للعدد الكبير من الأفراد المطلوب مشاركتهم فيه (لا سيّما بالنسبة إلى الأمراض النادرة) المراقبة الممتدّة على فترة زمنية طويلة.

ثمّة طريقة أكثر شيوعاً، لكنّها أقلّ فاعليّة، تتمثّل في دراسة الحالات والشواهد، يتمّ فيها اختيار عدد من الأفراد الذين يعانون بالفعل من مرض ألزهايمر، إلى جانب عدد من «الضوابط» - أي أفراد لهم خلفيّات متشابهة، ولكنّهم غير مصابين بالمرض. (سنرى في الفصل 3 سبب أهمّية المراقبة الدقيقة لخلفية الأفراد). على عكس الدراسة الطولية، التي يتمّ فيها اختيار المشاركين بشكل مستقلّ عن حالتهم المرضيّة، يتمّ اختيار المشاركين في دراسة الحالات والشواهد من بين حاملي المرض، بحيث نعجز عن استخراج تقدير لنسبة الإصابة بالمرض بين السكان ككلّ. هذا يعني أنّنا نحصل على توقّع متحيّز للخطر النسبي للإصابة بالمرض. مع ذلك، تسمح لنا هذه التجارب بحساب ما يسمّى بـ«نسب الأرجحية»، التي لا تتطلّب معرفة بإجمالي نسبة الإصابة بين السكّان.

إذا سبق لك الذهاب إلى سباق لكلاب الصيد أو سباق للخيول، فربّما كنت تذكر أنّه غالباً ما يتمّ التعبير عن احتمال فوز حيوان معيّن بالاحتمالات. ففي سباق معيّن، تبلغ احتمالات خسارة المشارك الغريب 5 إلى 1. هذا يعني أنّه إذا تمّ عرض السباق نفسه ستّ مرّات، فإنّنا نتوقّع خسارة هذا اللاعب الغريب خمس مرّات وفوزه مرّة واحدة. بالتالي، يبلغ احتمال فوز المشارك الغريب 1 من 6 أو 1/ 6. الطريقة الطبيعية للتفكير في «احتمالات الخسارة» هي نسبة احتمال عدم حدوث أمر إلى احتمال حدوثه (5/ 6 إلى 1/ 6 في هذه الحالة، أو ببساطة 5 إلى 1). بالمقابل، قد يكون لدى المشارك المفضّل في السباق احتمال فوز بنسبة 2 إلى 1. في الألعاب الرياضية، من المعتاد أن نضع دوماً الرقم الأكبر أوّلاً، لذلك نحن بحاجة إلى التمييز بين احتمالات الفوز واحتمالات الخسارة. يعبّر مصطلح «احتمالات الفوز»، وهو عكس احتمالات الخسارة، عن نسبة احتمال وقوع حدث إلى احتمال عدم حدوثه. في ظلّ احتمال 2 إلى 1، إذا تمّ عرض السباق نفسه ثلاث مرّات، فقد نتوقّع فوز المشارك المفضّل مرّتين وخسارته مرّة واحدة. بالتالي، يبلغ احتمال فوز المشارك المفضّل 2 من 3 أو 2/ 3، واحتمال خسارته 1/ 3، وهذا يعيدنا إلى احتمال الفوز بنسبة 2/ 3 إلى 1/ 3 أو ببساطة أكبر 2 إلى 1.

عندما تسمع المعلّقين أو ماسكي الدفاتر يتحدّثون عن المشارك «المفضّل للفوز»، عادة ما يكون ذلك في سباقات تضمّ عدداً صغيراً من الخيول. والعبارة ليست سوى حشو. فأيّ حصان محتمل فوزه هو حصان مفضّل، لأنّه لا يمكن وجود سوى حصان واحد في السباق يرجّح فوزه أكثر من خسارته. وفي سباق يضمّ عدداً أكبر من الخيول، من غير المعتاد أن يفوز حصان واحد بسباقات أكثر ممّا يخسر. على سبيل المثال، في سباق الخيل الأشهر في المملكة المتّحدة، غران ناشيونال، يتنافس ما مجموعه 40 حصاناً. حتّى الفائز في عام 2018، تايغر رول، الذي بدأ كمفضّل للفوز بسباق 2019 أيضاً (وفاز في النهاية)، كان احتمال خسارته يبلغ 4 إلى 1. وبما أنّه من غير المحتمل أن تفوز معظم الخيول بمعظم سباقاتها، ما لم يُنصّ صراحة على خلاف ذلك، فإنّ الاحتمالات ذات العدد الأكبر أوّلاً هي عادة احتمالات الخسارة.

في السيناريوهات الطبية، العكس هو الصحيح. عادة ما يتمّ التعبير عن الاحتمالات الإيجابية - أي احتمال وقوع حدث مقابل احتمال عدم وقوعه. وبما أنّنا نتحدّث عادة عن الأمراض النادرة (مع انتشار أقلّ من 50% بين السكّان)، فإنّ العدد الأصغر هو الذي يأتي أوّلاً في العادة.

لمعرفة كيفية حساب الاحتمالات الطبّية ونسبة الأرجحية المرغوبة، فلننظر في الدراسة الافتراضية للحالات والشواهد لآثار وجود متغيّرة واحدة ε4 (كما ظهر في ملف حمضي النووي)

على إمكانية الإصابة بمرض ألزهايمر في سنّ 85، من خلال الجدول 1. احتمال الإصابة بمرض ألزهايمر في عمر 85 عاماً، بالنسبة إلى الشخص الذي يملك نسخة واحدة من متغيّرة ε4 (مثلي)، هو حاصل قسمة عدد الأشخاص المصابين بالمرض (100) على عدد الأشخاص الذين لا يعانون منه (335): 100 إلى 335 أو، للتعبير عنها بالكسر، 100/ 335. وفقاً للمنطق نفسه، واعتماداً على أرقام الصفّ الثاني من الجدول، فإنّ احتمال الإصابة بالمرض في عمر الـ 85 إذا كان المرء يملك نسختين من المتغيّرة الشائعة ε3 هي 79 إلى 956 أو 79/ 956. بالتالي، فإنّ نسبة الأرجحية هي مقارَنة بين احتمالات الإصابة بالمرض على أساس نمط وراثي معيّن (نسخة واحدة من المتغيّرة ε4 ونسخة واحدة من المتغيّرة ε3، مثلاً) واحتمالات الإصابة بالمرض على أساس النمط الوراثي الأكثر شيوعاً (نسختان من المتغيّرة ε3). بالنسبة إلى الأرقام الافتراضية الواردة في الجدول 1، فإنّ نسبة الأرجحية هي 100/ 335 مقسومة على 79/ 956 بحيث يكون الحاصل 3.61. وتجدر الإشارة إلى أنّ نسب الأرجحية لا تتطلّب منّا معرفة معدّل الإصابة بالمرض بين عموم السكّان، وبالتالي يمكن حسابها بسهولة من خلال دراسات الحالات والشواهد.

	الإصابة بمرض ألزهايمر في سنّ 85	**عدم الإصابة بمرض ألزهايمر في سنّ 85**
ε4/ε3	100	335
ε3/ε3	79	956

الجدول 1: نتائج دراسة افتراضية للحالات والشواهد حول أثر متغيّرة واحدة ε4 على احتمال الإصابة بمرض ألزهايمر في سن 85

على الرغم من أنّ نسب الأرجحية لا تُظهر الخطر النسبي (نسبة خطر الإصابة بالمرض مع النمط الوراثي ε4/ε3 إلى خطر الإصابة بالمرض مع النمط الوراثي (ε3/ε3)، إلّا أنّه يمكن جمعها مع خطر إصابة السكّان ككلّ وتردّدات النمط الوراثي المعروفة لإيجاد احتمال الإصابة بالمرض لدى نمط وراثي معيّن. وهذا الحساب ليس تافهاً. إذ أنّه ما من طريقة واحدة لإجراء الحساب. فقد حاولتُ استنساخ مخاطر ظهور مرض الألزهايمر المتأخّر في تقريري الوراثي باستخدام الطريقة نفسها التي استخدمَتها andMe23 والبيانات المأخوذة مباشرة من التقرير أو من الدراسات التي ذكروها[38]. (في حال كنتَ مهتماً، فقد انطوى الحساب الذي أجريتُه لإيجاد احتمالات المرض على استخدام حلّال غير خطّي من أجل حلّ نظام من ثلاث معادلات مقترنة ببعضها لثلاثة احتمالات مشروطة غير معروفة - وهو أمر أستمتع بالعمل عليه في وظيفتي اليومية). فوجدتُ

تباينات صغيرة، ولكن يُحتمل أن تكون مهمّة، بين أرقامي وأرقامهم. وأوحت لي حساباتي أنّه يجدر بي النظر إلى أرقام andMe23 بشيء من التشكّك.

تعزّزت استنتاجي عندما صادفت نتائج دراسة أجريت عام 2014 على طرق حساب درجة الخطر لثلاث من شركات الجينوم الشخصية الرائدة، بما فيها andMe23[39]. إذ وجد الباحثون أنّ الاختلافات في الخطر الذي يهدّد إجمالي السكّان، وتردّدات النمط الوراثي، والصيغ الرياضية المستخدمة ساهمت كلّها في تفاوت المخاطر المتوقّعة بشكل كبير بين الشركات. وعندما استخدمت المخاطر المتوقّعة لتصنيف الأفراد ضمن فئات مخاطر مرتفعة أو منخفضة أو ثابتة، أصبحت التباينات أكثر وضوحاً. ووجدت الدراسة أنّ 65% من جميع الأفراد الذين تمّ اختبارهم بشأن سرطان البروستات صُنّفوا في فئات مخاطر متناقضة (مرتفعة أو منخفضة) من قبل اثنتين على الأقلّ من الشركات الثلاث. وفي نحو ثلثَي الحالات، ربّما تكون إحدى الشركات قد أبلغت العميل أنّه يتمتّع بصحّة جيّدة، بينما أخبرته شركة أخرى أنّه معرّض بشكل كبير لخطر الإصابة بسرطان البروستات.

إذا وضعنا جانباً احتمال ورود خطأ في الاختبارات الوراثية نفسها، أكون قد وجدت جواباً على سؤالي الثالث: ينبغي النظر بشيء من التشكّك إلى الحسابات العددية للمخاطر في تقارير الجينوم الشخصية الصحّية نظراً إلى التناقضات في النهج الرياضي المستخدَم.

لحظة الاكتشاف

ليس الاختبار الشخصي للحمض النووي المجال الوحيد الذي يضع بين أيدينا أدوات ذات علاقة بالصحّة. فثمّة الآن تطبيقات هاتفية يمكنها مراقبة نبض القلب أو تقدير اللياقة الهوائية، واختبارات منزلية تزعم أنّها قادرة على تشخيص أيّ شيء، من حالات التحسّس ومشاكل ضغط الدم إلى مشاكل الغدّة الدرقية أو حتّى الإصابة بفيروس نقص المناعة البشرية. لكنّ ظهور التطبيقات سبقه أداة تشخيص شخصية لا تتطلّب تكنولوجيا عالية كما أنّها أقلّ تكلفة ويمكن حسابها بسهولة: مؤشّر كتلة الجسم. يتمّ حساب مؤشّر كتلة جسم الفرد عن طريق قياس كتلته بالكيلوغرام وقسمة الرقم على مربّع طوله بالأمتار.

لأغراض التوثيق والتشخيص، يصنَّف الشخص الذي يبلغ مؤشّر كتلة الجسم لديه دون 18.5 بأنّه «ناقص الوزن». ويتراوح نطاق «الوزن الطبيعي» من 18.5 إلى 24.5، ويتراوح

تصنيف «الوزن الزائد» من 24.5 إلى 30. وتُعرَّف «السمنة» على أنّها الحالة التي يتجاوز فيها مؤشّر كتلة الجسم 30. ومع أنّه يصعب تقدير ذلك بدقّة، إلّا أنّ السمنة قد تكون سبباً في نحو 23% من الوفيات في الولايات المتّحدة. ويتكرّر هذا الاتّجاه، إلى حدّ أقلّ تطرّفاً بعض الشيء، في جميع أنحاء العالم. ففي أوروبا، تأتي السمنة في المرتبة الثانية بعد التدخين كسبب للوفاة المبكرة. إذ ترتفع حالات السمنة لدى البالغين والأطفال في جميع دول العالم تقريباً، وقد تضاعف معدّل انتشارها على مدار الأعوام الثلاثين الماضية. ويتمّ تحذير الأشخاص الذين يتبيّن من مؤشّر كتلة أجسامهم أنّهم يعانون من السمنة المفرطة من مخاطر أمراض قد تهدّد حياتهم مثل السكّري من النوع 2، والسكتات الدماغية، وأمراض القلب التاجية، وبعض أنواع السرطان، فضلاً عن زيادة مخاطر المشاكل النفسية، مثل الاكتئاب. واليوم، يُعتبر الوزن الزائد مسؤولاً عن عدد من الوفيات يفوق تلك الناتجة عن نقص الوزن.

بالنظر إلى الآثار الصحّية المتعلّقة بتشخيص السمنة، أو حتّى بزيادة الوزن، فربّما افترضتَ أنّ المقياس المستخدم لتشخيص هذه الحالات، وهو مؤشّر كتلة الجسم، له أساس نظري وتجريبي قويّ. ولكن للأسف، هذا أبعد ما يكون عن الحقيقة. إذ بدأ الحديث عن مؤشّر كتلة الجسم للمرّة الأولى في عام 1835 من قبل البلجيكي أدولف كيتليت، وهو عالم فلك مشهور، وإحصائي، وعالم اجتماع ورياضيّات، ولكنّه ليس طبيباً على وجه التحديد[40]. وباستخدام بعض الرياضيّات الهشّة، خلص كيتليت إلى أنّ «وزن الأشخاص مكتملي النموّ، وذوي أطوال مختلفة، يعادل مربّع القامة تقريباً». غير أنّ كيتليت استمدّ هذه الإحصائية من متوسّط البيانات على مستوى السكّان ولم يشِر إلى أنّ هذه النسبة تصحّ على فرد معيّن. كما أنّه لم يقترح أنّ تلك النسبة، التي ستعرف لاحقاً باسم «مؤشّر كيتليت»، يمكن استخدامها لاستنتاج مدى زيادة أو نقص وزن فرد معيّن، فما بالك بإعطاء معلومات عن صحّته. ولم يحدث هذا التطوّر حتّى عام 1972. فاستجابةً لمستويات غير مسبوقة من السمنة، أجرى الفيزيزلوجي الأميركي أنسل كيز (الذي سيربط لاحقاً بين الدهون المشبعة، وأمراض القلب، والأوعية الدموية) دراسة للعثور على أفضل مؤشّر للوزن الزائد[41]. فتوصّل إلى نسبة الكتلة إلى الطول المربّع نفسها التي أتى بها كيتليت، ورأى أنّ هذا المقياس يشكّل مؤشّراً جيّداً للسمنة لدى السكّان.

من الناحية النظرية، يملك أصحاب الوزن الزائد كتلة أعلى ممّا يوحي طولهم، وبالتالي مؤشّر كتلة جسم أعلى. أمّا من يعانون من نقص الوزن، فلديهم مؤشّر كتلة جسم أقلّ في المقابل. اكتسبت صيغة كيز لمؤشّر كتلة الجسم شعبية لشدّة بساطتها. فمع فرط زيادة وزننا كنوع وارتباط

النتائج الصحّية الضارّة ارتباطاً قاطعاً بالسمنة، بدأ علماء الأوبئة باستخدام مؤشّر كتلة الجسم كوسيلة لتتبّع عوامل الخطر المرتبطة بزيادة الوزن. في ثمانينيات القرن الماضي، اعتمدت كلّ من منظّمة الصحّة العالمية، وهيئة الخدمات الصحية الوطنية بالمملكة المتّحدة (NHS)، والمعهد الوطني للصحّة بالولايات المتّحدة (NIH) رسمياً مؤشّر كتلة الجسم أحادي القيمة لتحديد سمنة الأفراد. وتستخدم شركات التأمين على جانبي المحيط الأطلسي اليوم مؤشّر كتلة الجسم بشكل روتيني لتحديد أقساط التأمين أو حتّى لاتّخاذ قرار منح التأمين لشخص ما.

صحيح أنّ أصحاب الوزن الزائد يملكون عادة مؤشّر كتلة جسم أعلى، إلّا أنّه ليس من المستغرب ربّما ألّا تنطبق هذه الظاهرة على الجميع. فالمشكلة الرئيسة مع هذا المؤشّر أنّه لا يميّز بين العضلات والدهون. وهذا أمر مهمّ، لأنّ الدهون الزائدة في الجسم تعدّ مؤشّراً قويّاً على خطر الأمراض القلبية الوعائية. أمّا مؤشر كتلة الجسم فليس كذلك. فلو كان تعريف السمنة يعتمد بدلاً من ذلك على نسبة عالية من الدهون في الجسم، لتمّت إعادة تصنيف ما بين 15 إلى 35% من الرجال ذوي مؤشّر كتلة جسم طبيعي على أنّهم يعانون من السمنة المفرطة[42]. على سبيل المثال، يندرج الأشخاص «النحيلون السمينون»، الذين تنخفض لديهم نسبة العضلات وترتفع نسبة الدهون ويملكون بالتالي مؤشّر كتلة جسم طبيعي، ضمن فئة «البدينين ذوي الوزن الطبيعي» الذين لا يتمّ اكتشافهم بسهولة. وقد وجدت دراسة حديثة شملت 40.000 شخص أنّ 30% من ذوي مؤشّر كتلة الجسم الطبيعي كانوا يعانون من مشاكل في القلب. بالتالي، يبدو أنّ أزمة البدانة قد تكون أسوأ بكثير ممّا تشير إليه الأرقام المستنِدة إلى مؤشّر كتلة الجسم. مع ذلك، فقد تبيّن أنّ مؤشّر كتلة الجسم يسيء في تشخيص البدانة، زيادة أو نقصاناً على حدّ سواء. كما وجدت الدراسة نفسها أنّ ما يصل إلى نصف الأفراد الذين صنّفهم مؤشّر كتلة الجسم على أنّهم يعانون من الوزن الزائد وأكثر من ربع الأفراد الذين تبيّن أنّهم يعانون من السمنة المفرطة استناداً إلى مؤشّر كتلة الجسم كانوا يتمتّعون بصحّة أيضية جيّدة[43].

لهذه التصنيفات غير الدقيقة آثار على طريقة قياس وتسجيل البدانة على مستوى السكّان. ولعلّ الأمر الأكثر مدعاة للقلق أنّ تشخيص الأفراد الأصحّاء على أنّهم يعانون من الوزن الزائد أو البدانة بناءً على مؤشّر كتلة الجسم لديهم قد يكون له أيضاً آثار ضارّة على صحّتهم العقلية[44]. في سنّ المراهقة، كافحت الصحفية والكاتبة ريبيكا ريد مع اضطرابات الأكل. وقد استشهدت بدرس في علم الأحياء تعلّمت فيه كيفية قياس مؤشّر كتلة الجسم كنقطة انطلاق رئيسة لنضالاتها. فمع أنّها كانت راضية عن جسدها في السابق، إلّا أنّها عندما قاست مؤشّر كتلة الجسم لديها، صُنّفت في فئة

الوزن الزائد. فأصابها الهوس لدرجة أنّها بدأت برنامجاً غذائياً ورياضياً صارماً جعلها تخسر نحو 4.5 كلغ في غضون أسابيع قليلة. وفي إحدى المرّات، أغمي عليها وهي بمفردها في غرفة نومها بينما كانت تحاول أن تقيّد نفسها بـ 400 سعرة حرارية فقط في اليوم. وحين لا تتّبع نظام حمية، كانت تعاقب نفسها بالإفراط في تناول الطعام ومن ثمّ تقيّؤ ما أكلته للتعويض عن ذلك. هكذا، وعوضاً عن أن يشكّل ذلك تذكيراً يشجّع بلطف على ممارسة المزيد من الرياضة، تصف ريبيكا تصنيفها في فئة الوزن الزائد على أنّه «محطِّم للثقة». ومن المفارقات أنّه بصرف النظر عن شكل الجسم وحجمه، يتمّ روتينياً تصنيف الأفراد الذين يتعافون من اضطرابات الأكل على أنّهم «يتعافون» عندما يصل مؤشّر كتلة الجسم لديهم إلى 19، أي ضمن النطاق «الصحّي». وبعد اتّخاذ الخطوة الصعبة للغاية المتمثّلة في الاعتراف لأنفسهم أنّهم يواجهون مشكلة والسعي للحصول على المساعدة، يتمّ حرمان بعض مرضى اضطرابات الأكل من الدعم بحجّة أنّ مؤشّر كتلة الجسم لديهم هو ضمن النطاق «الصحّي».

من الواضح إذاً أنّ مؤشّر كتلة الجسم ليس دليلاً دقيقاً على الحالة الصحّية في كلا طرفيه. بدلاً من ذلك، من الأفضل الوصول إلى مقياس مباشر لنسبة الدهون في الجسم يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالنتائج الصحّية لأمراض القلب والأوعية الدموية. وللقيام بذلك، نحتاج إلى استعارة فكرة عمرها 2000 عام، من مدينة سيراكوز القديمة في جزيرة صقلية.

* * *

نحو عام 250 قبل الميلاد، طلب هويرو الثاني، ملك سيراكوز، من أرخميدس، عالِم الرياضيّات البارز في العصور القديمة (والمواطن المحلّي) المساعدة في حلّ مشكلة مثيرة للجدل. كان الملك قد كلّف صائغاً بأن يصنع له تاجاً من الذهب الخالص. وبعد استلامه التاج وسماعه شائعات غير مطمئنة عن سمعة الصائغ، خشي أن يكون قد تعرّض للغشّ وأن يكون الصائغ قد مزج مع الذهب معادن أخرى أقلّ ثمناً وأخفّ وزناً لخفض التكاليف. فطلب من أرخميدس أن يعرف ما إذا كان التاج مغشوشاً من دون أن يأخذ عيّنة منه أو يضرّ به.

أدرك عالم الرياضيّات اللامع أنّه لحلّ هذه المشكلة، يتحتّم عليه حساب كثافة التاج. إذا تبيّن أنّ التاج أقلّ كثافة من كثافة الذهب الخالص، فالمعدن مغشوش. يتمّ حساب كثافة الذهب الخالص بسهولة عن طريق أخذ كتلة من الذهب منتظمة الشكل، وحساب حجمها، ومن ثمّ أخذ وزنها لمعرفة كتلتها. وعند قسمة الكتلة على الحجم، نحصل على الكثافة. لو كان باستطاعته تطبيق هذه العمليّة

على التاج، فإنّه سيتمكّن من مقارنة كثافة الاثنين. كان الحصول على وزن التاج أمراً سهلاً، لكنّ المشكلة تكمن في معرفة حجمه، بسبب شكله غير المنتظم. أعاقت هذه المشكلة أرخميدس لبعض الوقت، إلى أن قرّر في أحد الأيّام أن يستحمّ. ما إن دخل في حوض الاستحمام المليء بالماء، حتّى لاحظ أنّ بعض الماء فاض منه. حين فكّر بالأمر، أدرك أنّ حجم الماء الذي فاض من الحوض الممتلئ لا بدّ أن يكون مساوياً لحجم جسده غير المنتظم الذي غاص في الماء. هكذا عثر على الفور على طريقة لتحديد حجم التاج، ومن ثمّ كثافته. يروي فيتروفيو أنّ أرخميدس طار فرحاً باكتشافه، حتّى أنّه قفز فوراً من الحوض وراح يجري عارياً ومبتلّاً في الشارع وهو يصرخ «يوريكا»! (أي وجدتُها). إنّها لحظة الاكتشاف الأصلية.

حتّى اليوم، تُستخدم طريقة الإزاحة أو الطفو التي اكتشفها أرخميدس لحساب حجم الأشياء غير منتظمة الشكل. وفي حال كنتَ تفكّر في بدء حملة صحّية، يمكنك استخدامها لتحديد مقدار العصير الذي سينتج عن طحن مزيج من الفاكهة والخضروات غير منتظمة الشكل. كذلك، عبر نفخ أكبر قدر ممكن من الهواء في كيس فارغ محكم الإغلاق ومن ثمّ ختمه وغمره بالماء، يمكنك استخدام مبدأ أرخميدس لتقدير سعة رئتيك بعد بضعة أسابيع من بدء برنامج رياضي جديد.

للأسف، وعلى الرغم من فائدة طريقة الطفو الموصوفة في تلك القصّة الشائعة، إلّا أنّه من غير المرجّح أن تكون هذه هي الطريقة التي حلّ بها أرخميدس المشكلة. فقد كان من المفترض أن تكون قياسات أرخميدس لحجم المياه التي أزاحها التاج دقيقة للغاية. وعوضاً عن ذلك، من الأرجح أن يكون أرخميدس قد استخدم فكرة ذات صلة مستمدّة من الهيدروستاتيكا، أصبحت في ما بعد تُعرف باسم مبدأ أرخميدس.

ينصّ المبدأ على أنّ الجسم الموضوع في سائل (مائي أو غازي) يتعرّض لقوّة طفو مساوية لوزن السائل الذي يُزيحه. بمعنى أنّه كلّما زاد حجم الشيء المغمور، ازداد السائل المزاح، وبالتالي القوّة الصاعدة التي يتعرّض لها لمواجهة ثقله. وهذا ما يفسّر سبب طفو سفن الشحن الضخمة، شرط أن يكون وزن السفينة وحمولتها أقلّ من وزن الماء الذي تزيحه. ويرتبط المبدأ أيضاً ارتباطاً وثيقاً بخاصّية الكثافة، أي كتلة الشيء مقسومة على حجمه. فالجسم الذي تزيد كثافته عن كثافة الماء يزن أكثر من الماء الذي يزيحه، وبالتالي فإنّ قوّة الطفو لا تكفي لمواجهة وزن الجسم. وهكذا، فإنّ الجسم يغرق.

باستخدام هذه الفكرة، ما كان على أرخميدس سوى تحقيق توازن بين التاج من جهة وكتلة مساوية من الذهب الخالص من الجهة الأخرى. في الهواء، ستتوازن كفّتا الميزان. لكن عند وضع

الميزان تحت الماء، فإنّ التاج المزيّف (الذي سيكون حجمه أكبر من كتلة الذهب نفسها الأكثر كثافة) سيواجه قوّة طفو أكبر وهو يزيح المزيد من الماء، وبالتالي ستعلو كفّته.

هذا هو بالضبط مبدأ أرخميدس المستخدَم عند حساب نسبة الدهون في الجسم بدقّة. إذ يتمّ وزن الشخص أوّلاً في ظروف طبيعية، ثمّ يعاد وزنه وهو جالس مغموراً تماماً بالماء على كرسي متّصل بميزان. ويمكن عندئذٍ استخدام الاختلافات في قياسات الوزن خارج الماء وتحته لحساب قوّة الطفو التي يتعرّض لها الفرد تحت الماء، والتي يمكن استخدامها بدورها لتحديد حجمه، بحسب الكثافة المعروفة للمياه. بعد ذلك يُستخدم الحجم بالاقتران مع أرقام كثافة الدهون والمكوّنات الخالية من الدهون في جسم الإنسان، لتقدير النسبة المئوية للدهون وإعطاء تقييمات أكثر دقّة للمخاطر الصحّية.

المعادلة المصيرية

مؤشّر كتلة الجسم ليس سوى أداة واحدة من عدد كبير من الأدوات الرياضية المختلفة التي يتمّ استخدامها بشكل روتيني خلال ممارسة الطبّ الحديث. تتفاوت الأدوات الأخرى من الكسور البسيطة لحساب جرعات المخدّرات، إلى الخوارزميات المعقّدة لإعادة بناء صور الأشعّة المقطعية. في الرعاية الصحّية في المملكة المتّحدة، ثمّة ربّما صيغة واحدة تبرز فوق كلّ الصيغ الأخرى في جدليّتها، وأهمّيتها، وآثارها واسعة النطاق. تحدّد «المعادلة المصيرية» العقاقير الجديدة التي سيتمّ دفع ثمنها من قبل هيئة الخدمات الصحية الوطنية (NHC)، بالتالي، فهي تحدّد حرفيّاً من سيحيا ومن سيموت. فعند إصابة طفل بمرض عضال، قد يرى الأهل أنّهم مستعدّون لدفع أيّ ثمن من أجل شراء مزيد من الوقت مع طفلهم الصغير. غير أنّ «المعادلة المصيرية» ترى عكس ذلك.

في نوفمبر 2016، نُقل رودي، ابن دانييلا وجون إلس، البالغ من العمر 14 شهراً، إلى مستشفى شيفيلد للأطفال. تمّ ربطه بجهاز تنفّس اصطناعي لإبقائه على قيد الحياة، وأخبر الأطبّاء دانييلا وجون أنّ رودي قد لا يعيش حتّى الصباح. كان سبب الحالة عدوى شائعة في الصدر يتغلّب عليها معظم الأطفال بسهولة. لكنّ رودي لم يكن كغيره من الأطفال، بل يعاني من ضمور العضلات الشوكي.

عندما كان رودي في شهره السادس، وبعد أن فشل الأطبّاء في معرفة سبب مرضه، ساعدت دانييلا وجون في تشخيص إصابة ابنهما بضمور العضلات الشوكي، وذلك بعدما اكتشفا أنّ

ابن عمّ جون كان يعاني من المرض نفسه. مع مرض رودي، الذي يؤدّي إلى الهزال العضلي التدريجي، لا يُتوقّع بقاء المريض على قيد الحياة أكثر من عامين. لكن لحسن الحظّ، ثمّة دواء يدعى Spinraza، تمّ تطويره من قبل شركة Biogen، يمكنه إيقاف تقدّم المرض وحتّى تخفيف بعض آثاره المعوّقة. ومن شأن هذا الدواء تحسين حياة المرضى أمثال رودي وإطالتها، ولكن في إنكلترا في عام 2016، عندما كان رودي يكافح في المستشفى من أجل البقاء، لم يكن الدواء متاحاً مجانّاً.

من الناحية النظرية، في الولايات المتّحدة، بمجرّد أن توافق إدارة الغذاء والدواء على طرح دواء في الأسواق، يصبح الدواء متاحاً للمرضى. وقد تمّت الموافقة على Spinraza من قبل إدارة الغذاء والدواء في ديسمبر 2016. عمليّاً، تملك معظم شركات التأمين قائمة «ترخيص مسبق» للعقاقير باهظة الثمن أو المشتملة على مخاطر محتملة. وبالنسبة إلى كلّ علاج، تنصّ القائمة على مجموعة من الشروط التي يتمّ استيفاؤها قبل منحه لمريض معيّن. وقد تمّ إدراج Spinraza على قائمة الترخيص المسبق لكلّ شركات التأمين. بالطبع، يعتمد الوصول إلى الرعاية الصحّية في الولايات المتّحدة أيضاً على القدرة على تحمّل تكاليف التأمين الطبّي. في عام 2017، كان 12.2% من الأميركيين غير مؤمَّنين، وما زالت الولايات المتّحدة الدولة الصناعية الوحيدة التي لا توفّر تغطية شاملة للرعاية الصحّية.

على العكس، تتوفّر الرعاية الصحّية في إنكلترا للجميع، مجّاناً عند نقطة الاستخدام، وتتمّ تغطية تكاليفها إلى حدّ كبير عن طريق الضرائب العامّة. وتعتبر الوكالة الأوروبية للأدوية (EMA) ووكالة تنظيم الأدوية ومنتجات الرعاية الصحّية مسؤولتين عن الموافقة على سلامة وفاعلية الأدوية في إنكلترا. في مايو 2017، وافقت الوكالة الأوروبية للأدوية على وضع Spinraza قيد الاستخدام. ولكن، بما أنّ هيئة الخدمات الصحية الوطنية محدودة الميزانية، فهي عاجزة عن الموافقة على كلّ علاج جديد يظهر في السوق. فمن شأن القرارات التي تتّخذ بطريقة أو بأخرى أن تؤدّي مثلاً إلى تخفيضات في توفير الرعاية الاجتماعية، أو نقص في معدّات التشخيص أو العلاج لمرضى السرطان، أو نقص عدد العاملين في وحدات رعاية الأطفال حديثي الولادة. لذا يُعدّ المعهد الوطني للرعاية الصحّية والتفوّق (NICE) الهيئة المسؤولة عن اتّخاذ هذه القرارات الصعبة. وعندما يتعلّق الأمر بالأدوية، ثمّة صيغة راسخة يضمن من خلالها المعهد اتّخاذ قرارات موضوعية.

تحاول المعادلة المصيرية الموازنة بين مقدار «الفوائد الصحّية» الإضافية التي يقدّمها الدواء للمريض والمبلغ الإضافي المطلوب من هيئة الخدمات الصحية الوطنية دفعه مقابل ذلك. وفي

الواقع، فإنّ تقييم الأوّل مهمّة صعبة. إذ كيف يمكن للمرء مقارنة مزايا الدواء الذي يقلّل من مخاطر الإصابة بأمراض القلب، على سبيل المثال، بفوائد الدواء الذي يطيل عمر مريض السرطان؟

يستخدم المعهد الوطني للرعاية الصحّية والتفوّق معياراً مشتركاً يعرف باسم عدد السنوات المصحّحة بجودة الحياة (QALY). وعند مقارنة علاج جديد بالعلاج الحالي، فإنّ هذا المعيار لا يأخذ فقط بعين الاعتبار كم يمكن للدواء أن يطيل عمر المريض، بل أيضاً نوعيّة الحياة التي يوفّرها. هكذا، قد تنتج QALY واحدة عن دواء السرطان الذي يمدّد حياة المريض لمدّة عامين، من دون أن يتمتّع سوى بـ 50% من صحّته، أو قد تنتج عن جراحة استبدال للركبة، وهي عمليّة لا تساهم في تمديد السنوات العشر من العمر المتوقّع للمريض، ولكنّها تحسّن نوعيّة حياته بنسبة 10%. وقد يسهم العلاج الناجح لسرطان الخصية في الحصول على عدد كبير من الـ QALY، لأنّه يزيد إلى حدّ كبير من متوسّط العمر المتوقّع للمرضى الشباب عادة من دون خفض نوعيّة حياتهم.

بمجرّد تحديد رقم QALY موثوق، يمكن مقارنة الفرق بين الـ QALY وتغيّر التكاليف بين العلاجين الجديد والقديم. إذا انخفضت الـQALY، فسيتمّ رفض العلاج الجديد. أمّا إذا ارتفعت الـQALY وانخفضت التكلفة، فمن الطبيعي أن يتمّ تمويل علاج جديد أكثر فاعلية وأقلّ تكلفة. مع ذلك، وكما هو الحال في أغلب الأحيان، إذا ارتفع كلّ من الـQALY والتكاليف، فسيتعيّن على المعهد الوطني للرعاية الصحّية والتفوّق اتّخاذ القرار. في هذه الحالات، يتمّ حساب النسبة الإضافية لفاعلية التكلفة (ICER) عن طريق قسمة زيادة الـQALY على الزيادة في التكلفة. وتشير النسبة الإضافية لفاعلية التكلفة إلى التكلفة الإضافية لكلّ QALY. عموماً، حدّد المعهد الحدّ الأقصى لقيمة النسبة الإضافية لفاعلية التكلفة التي سيموّلها ما بين 20,000 و30,000 جنيه استرليني لكلّ QALY.

لا يلتزم صنّاع السياسة في الولايات المتّحدة بتحليلات فاعلية التكلفة هذه. وفي الواقع، يحظر قانون حماية المريض والرعاية الميسّرة لعام 2010، والمعروف أكثر باسم Obamacare، الحكومة الفيدرالية من استخدام عتبة مالية للـQALY[45]. مع ذلك، فإنّ للـQALY دور فاعل في الأحكام المتعلّقة بالرعاية الصحّية في الولايات المتّحدة، حيث إنّ اللجنة الأميركية حول فاعلية التكلفة في الصحّة والطبّ تدعم استخدامها[46]. كما يتمّ استخدام الـQALY أيضاً بشكل غير رسمي من قبل صنّاع القرار في الولايات المتّحدة لتحديد ما إذا كانت الاستثمارات تمثّل قيمة المال. هكذا، غالباً ما تُعتبر 50,000 دولار لكلّ QALY الحدّ الأعلى، وتتمّ الموافقة على «التدخّلات المؤاتية» التي لا تتجاوز كلفتها هذا الحدّ[47].

في أغسطس 2018، انتظر مرضى ضمور العضلات الشوكي وأسرهم، بمن فيهم دانييلا وجون ورودي، بقلق لمعرفة ما إذا كان المعهد الوطني للرعاية الصحّية والتفوّق سيوافق على وضع Spinraza قيد الاستعمال في هيئة الخدمات الصحية الوطنية. أقرّ المعهد أنّ Spinraza «يوفّر فوائد صحّية مهمّة» للمرضى الذين يعانون من ضمور العضلات الشوكي. وكانت نتائج تحسين نوعية الحياة إيجابية للغاية. إذ كان من المتوقّع أن يولّد العقار QALY 5.29 إضافية. مع ذلك، فإنّ التكلفة الإضافية بلغت 2,160,048 جنيه استرليني، أي أنّ النسبة الإضافية لفاعلية التكلفة تزيد عن 400,000 جنيه استرليني لكلّ QALY مكتسبة، وهذا يتجاوز بكثير عتبة المعهد. على الرغم من الشهادات المقنعة لمرضى ضمور العضلات الشوكي ومقدّمي الرعاية لهم، فإنّ المعادلة المصيرية تعني أنّ الخيار الوحيد هو حظر استخدام Spinraza في هيئة الخدمات الصحية الوطنية.

من حسن حظّ أسرة إلس، كان رودي مسجّلاً في برنامج موسّع تديره الشركة المصنّعة Biogen، يسمح للأطفال المصابين بالنوع 1 من الضمور بالحصول على الدواء. وفي فبراير 2019، تلقّى حقنته العاشرة وهو الآن في سنّ الثالثة، ويتمتّع بصحّة جيّدة، وقد تجاوز بكثير متوسّط العمر المتوقّع لمرضى النوع 1 من ضمور العضلات الشوكي الذين يستخدمون Spinraza. لكن في نوفمبر 2018، تمّ إغلاق البرنامج أمام المشاركين الجدد. وما زال عقار Spinraza، الذي ينقذ الحياة ويطيل متوسّط العمر المتوقّع، غير متاح في هيئة الخدمات الصحّية الوطنية لمرضى ضمور العضلات الشوكي الجدد في إنكلترا.

إنذارات خاطئة

يمكن اعتبار تطبيق «المعادلة المصيرية» على أنّه محاولة لأخذ القرارات الصعبة بشأن الحياة والموت من بين أيدينا المتأثّرة بالعاطفة ووضعها تحت سيطرة صيغة رياضية موضوعية. تلعب وجهة النظر هذه على الحياد والموضوعية الظاهريَين للرياضيّات، لكنّها تتجاهل الاعتراف بأنّ القرارات الشخصية تحوَّل ببساطة بعيداً عن الأنظار في شكل أحكام على نوعية الحياة وعتبات فاعلية التكلفة في المراحل المبكرة من عمليّة اتّخاذ القرار. غير أنّنا سنبحث بتفصيل أكبر في موضوع الحياد الظاهري للرياضيّات في الفصل 6، عندما ننظر في أشكال تطبيق تحسين الخوارزمية في حياتنا اليومية.

بعيداً عن البيروقراطية التي تعمل خلف الكواليس، والتي تُغذّي قرارات غالباً ما تكون غير مرئية في أنظمة الرعاية الصحّية لدينا، يتمّ استخدام الرياضيّات في الخطوط الأمامية في المستشفيات من أجل إنقاذ الأرواح. وكما سنرى قريباً، ثمّة مكان مهمّ للغاية بدأت الرياضيّات تُحدث تأثيرها فيه، ألا وهو الحدّ من الإنذارات الكاذبة في وحدة العناية المركّزة.

تشير الإنذارات الكاذبة عادةً إلى الإنذار الناتج عن شيء آخر غير الحافز المتوقّع. ويُعتقَد أنّ 98% من إنذارات السرقة في الولايات المتّحدة هي إنذارات كاذبة. وهذا ما يطرح السؤال التالي، «ما جدوى الإنذار أساساً؟». فعندما نعتاد على التنبيهات الخاطئة، نصبح أكثر تردّداً في التحقيق في أسبابها.

إنّ أجهزة الإنذار ضدّ السرقة ليست بأيّ حال من الأحوال التحذيرات الوحيدة التي أصبحنا معتادين عليها. فعندما ينطلق كاشف الدخان، نكون أساساً قد فتحنا النافذة وبدأنا بإزالة السخام عن الخبز المحمّص. وعندما نسمع جهاز إنذار لسيّارة في الخارج، فإنّ قلّة منّا سينهضون عن الأريكة ويطلّون برؤوسهم إلى الخارج لمعرفة ما يجري. عندما تصبح الإنذارات مصدر إزعاج أكثر من كونها مساعداً، وعندما لا نثق في نتيجتها، يُقال إنّنا نعاني من إجهاد الإنذارات. وهذه مشكلة لأنّ الحالات التي تصبح فيها أجهزة الإنذار روتينية بحيث نتجاهلها أو نعطّلها تماماً، قد تكون أقلّ عقلانية من عدم وجود إنذار في المقام الأوّل، كما اكتشفت عائلة ويليامز مع الأسف.

قضت ميكاييلا ويليامز معظم عامها الثانوي الأوّل وهي تحلم أن تصبح مصمّمة أزياء. عانت لبعض الوقت من التهابات متكرّرة وطويلة الأمد في الحلق. ومع أنّ استئصال اللوزتين يصبح أكثر عرضة للمضاعفات لدى المراهقين مقارنة بالأطفال، إلّا أنّ ميكاييلا وأسرتها اتّخذوا القرار بإجراء الجراحة لتحسين نوعية حياتها. بعد ثلاثة أيّام من عيد ميلاد ميكاييلا السابع عشر، تمّ إدخالها كمريضة خارجية إلى المركز الجراحي المحلّي. وبعد جراحة روتينية استغرقت أقلّ من ساعة، نُقلت إلى غرفة الإنعاش بينما أُبلغت والدتها أنّ العملية كانت ناجحة وسوف تتمكّن من نقل ابنتها إلى المنزل في وقت لاحق من ذلك اليوم. من أجل تخفيف الانزعاج في غرفة الإنعاش، أُعطيت ميكاييلا عقار فنتانيل، وهو مسكّن قويّ يرتكز على الأفيون. وكانت صعوبة التنفّس من الآثار الجانبية المعروفة، ولكن النادرة نسبيّاً للعقار. لهذا السبب، قامت الممرّضة بتوصيل ميكاييلا إلى جهاز مراقبة يقيس علاماتها الحيوية، قبل الذهاب للتحقّق من المرضى الآخرين. صحيح أنّه تمّ إسدال الستائر حولها، إلّا أنّ جهاز المراقبة سينبّه الممرضة على الفور إلى أيّ تدهور في حالة ميكاييلا.

في الواقع، هذا ما كان ليحدث لو لم يتمّ كتم صوت الجهاز.

خلال العناية بالعديد من المرضى في وقت واحد في غرفة الإنعاش، كانت الإنذارات الكاذبة المستمرّة مصدر إزعاج يمنع الممرّضات من أداء وظائفهنّ بكفاءة. إذ كانت تُجبرهنّ على إيقاف إجراء معيّن مع أحد المرضى لإعادة ضبط جهاز الإنذار مع مريض آخر، الأمر الذي يكلّف الممرّضات وقتاً حيوياً، ناهيك عن تعطيل تركيزهنّ. لهذا السبب، ابتكرت الممرضات حلّاً بسيطاً يسمح لهنّ بمواصلة مهامهنّ من دون انقطاع. وأصبح إطفاء أجهزة المراقبة أو حتّى كتم صوتها تماماً تجنّباً للإنذارات الخاطئة المستمرّة ممارسة روتينية في غرفة الإنعاش.

بعد وقت قصير من إسدال الستائر حول ميكاييلا، تسبّب الفنتانيل في انخفاض كبير في قدرتها على التنفّس. فانطلق المنبّه الذي يُنذر بنقص التهوية، لكنّ أحداً لم يرَ الضوء الوامض من خلال الستارة أو يسمع صوت الجهاز بالتأكيد. ومع استمرار انخفاض مستويات الأكسجين لديها، بدأت خلاياها العصبية تنتفض بشكل خارج عن السيطرة، ممّا أدى إلى عاصفة كهربائية فوضوية تسبّبت في أضرار في الدماغ لا يمكن إصلاحها. وعندما تمّ فحص ميكاييلا في المرّة التالية، أي بعد 25 دقيقة من إعطائها الفنتانيل، كانت قد أصيبت بأضرار بالغة في المخّ، وخسرت جميع فرصها في البقاء على قيد الحياة. هكذا توفّيت بعد 15 يوماً.

* * *

بالنسبة إلى المرضى أمثال ميكاييلا، الذين يتعافون من العمليّات الجراحية، أو يُضطرّون لقضاء بعض الوقت في العناية المركّزة، ثمّة فوائد أكيدة لمراقبة علاماتهم الحيوية بواسطة أجهزة الإنذار الآلية التي تكشف كلّ شيء، من معدّل ضربات القلب وضغط الدم، إلى أكسجة الدم والضغط داخل الجمجمة. عادةً، يتمّ التلاعب بهذه الأجهزة بحيث ينطلق المنبّه عندما تتحرّك الإشارة المكتشفة فوق أو تحت حدّ معيّن. مع ذلك، فإنّ ما يقرب من 85% من التحذيرات الآلية في وحدات العناية المركّزة هي في الواقع إنذارات خاطئة[48].

ثمّة عاملان يتسبّبان في ارتفاع معدّلات الإنذارات الخاطئة. أوّلاً، ولأسباب بديهية، يتمّ تعيين أجهزة الإنذار في وحدات العناية المركّزة لتكون حسّاسة للغاية. فتُحدَّد عتبات أجهزة الإنذار عمداً على مقربة من المستويات الفيزيولوجية الطبيعية من أجل ضمان كشف أدنى حالات الخلل. ثانياً، وبدلاً من الحاجة إلى إشارة غير طبيعية مستدامة، تنطلق الإنذارات في اللحظة التي تتجاوز فيها الإشارة العتبة المحدّدة. عند الجمع بين هذين العاملَين، يكفي أدنى ارتفاع في ضغط الدم مثلاً، ولو للحظة واحدة، إلى إطلاق الإنذار. وفي حين أنّ هذا الارتفاع قد يكون مؤشّراً إلى ارتفاع خطير في ضغط الدم، إلّا أنّه من المرجّح أكثر أن يكون ناتجاً عن تغيّر طبيعي أو ضوضاء في أجهزة

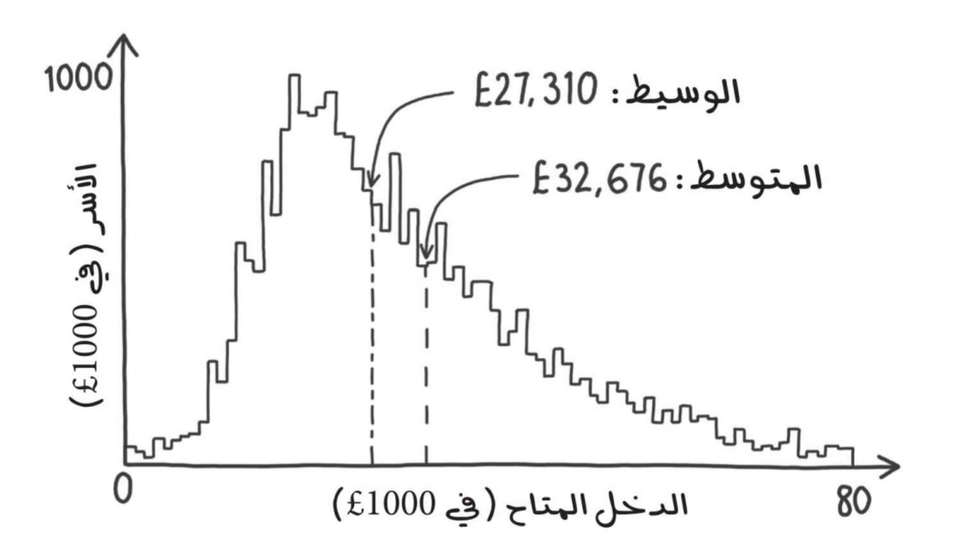
القياس. مع ذلك، إذا بقي ضغط الدم مرتفعاً لفترة زمنية متواصلة، فمن غير المرجّح أن نعزو ذلك إلى خطأ في القياس. ولحسن الحظّ، لدى الرياضيّات طريقة بسيطة لحلّ هذه المشكلة.

يُعرف الحلّ باسم التصفية. وفي هذه العمليّة، يتمّ استبدال الإشارة في نقطة معيّنة بالمتوسّط الذي يعلو النقاط المجاورة لها. يبدو ذلك معقّداً، لكنّنا نواجه البيانات التي تمّت تصفيتها طوال الوقت. فعندما يزعم علماء المناخ أنّنا «مررنا للتوّ بأحرّ عام منذ بداية السجلات»، هم لا يقارنون بيانات درجة الحرارة على أساس يومي. عوضاً عن ذلك، فهم يأخذون متوسّط الحرارة في كلّ أيّام السنة، ويجانسون درجات الحرارة اليومية المتقلّبة، للتوصّل إلى نتيجة تسهّل عمليّة المقارنة.

تميل التصفية إلى تخفيف الإشارات، بحيث تصبح الارتفاعات أقلّ بروزاً. فعندما تلتقط صورة بكاميرا رقمية في ظروف إضاءة منخفضة، غالباً ما تنتج صورة باهتة عن التعرّض الطويل المطلوب. فتظهر وحدات بِكْسل ساطعة من حين إلى آخر في المناطق الداكنة من الصورة والعكس بالعكس. وبما أنّ حدّة البكسل في الصورة الرقمية يتمّ تمثيلها رقمياً، فمن الممكن استخدام التصفية لاستبدال قيمة كلّ بكسل بالقيمة المتوسّطة للبكسلات المجاورة، وتصفية الضوضاء، وإعطاء صورة أكثر سلاسة.

يمكننا أيضاً استخدام أنواع مختلفة من المعدّلات عند التصفية. أكثر معدّل مألوف لدينا هو المتوسّط. لإيجاده، نضيف جميع القيم في مجموعة بيانات ونقسمها على عدد القيم الموجودة. على سبيل المثال، إذا أردنا العثور على متوسّط طول بياض الثلج والأقزام السبعة، فعلينا أن نضيف أطوالهم ونقسمها على ثمانية. وسيتأثّر هذا المعدّل بطول بياض الثلج الأكبر بين المجموعة. غير أنّه ثمّة معدّل أكثر تمثيلاً يدعى الوسيط. لإيجاد الارتفاع الوسيط للفريق، نصفّ الأقزام مع بياض الثلج بالترتيب بحسب الطول (بياض الثلج في المقدّمة، ودقدق في الخلف) ونأخذ طول الشخص الأوسط. لكن نظراً لوجود ثمانية أشخاص في الصفّ، فنحن لا نملك شخصاً متوسّطاً واحداً. بدلاً من ذلك، نأخذ متوسّط ارتفاع الشخصين الموجودَين في الوسط (غضبان ونعسان) كوسيط. وباستخدام الوسيط، نكون قد نجحنا في إزالة طول بياض الثلج الزائد الذي أثّر على المعدّل المتوسّط. للسبب نفسه، غالباً ما يتمّ استخدام الوسيط عند تقديم بيانات عن متوسّط الدخل. فكما سيتّضح في الشكل 4، تميل الأجور المرتفعة للأفراد الأغنياء في مجتمعاتنا إلى تشويه المعدّل المتوسّط - وهي فكرة سنصادفها مجدّداً في سياق الرياضيّات المضلِّلة في قاعات المحاكم في الفصل التالي. لذلك يعطينا الوسيط فكرة أفضل عمّا يمكن توقّعه من دخل الأسرة «النموذجي» المتاح. بالطبع، يمكن القول إنّه لا ينبغي إهمال طول بياض الثلج أو أصحاب الدخل المرتفع في هذه الإحصائيات، لكونها صالحة

مثل أيّ نقطة بيانات أخرى في المجموعة. ومع أنّ هذا قد يكون صحيحاً، إلّا أنّ كلا المعدّلين، المتوسّط أو الوسيط، غير دقيقَين بالمعنى الموضوعي. فالمعدّلات المختلفة مفيدة ببساطة لتطبيقات مختلفة.



الشكل 4: تواتر الأسر البريطانية ذات الدخل المتاح (بعد الضريبة) (بـ 1000 جنيه استرليني) في عام 2017. يمكن اعتبار الوسيط (27,310 جنيه استرليني) أنّه يمثّل الدخل المتاح «العادي» للأسرة بشكل أفضل من المتوسّط (£ 32,676).

عند تصفية صورة رقمية باهتة، نحن نسعى إلى إزالة تأثيرات قيم البكسل الزائفة. وعند تعديلها مع قيم البكسل المجاورة، فإنّ التصفية المتوسّطة ستعدّل، لكنّها لن تزيل تماماً هذه القيم القصوى. بالمقابل، تتجاهل التصفية الوسيطة قيم البكسلات الصاخبة للغاية من خلال عدم حسابها.

للسبب نفسه، بدأ استخدام التصفية الوسيطة في شاشات وحدة العناية المركّزة لتجنّب الإنذارات الكاذبة[49]. فبأخذ القراءة الوسيطة بين عدد من القراءات المتسلسلة، لا تنطلق الإنذارات إلّا إذا تمّ اختراق العتبات لفترة زمنية مستدامة (مع أنّها تظلّ قصيرة)، بدلاً من انطلاقها نتيجة ارتفاع أو هبوط واحد في قراءات الشاشة. ومن شأن التصفية الوسيطة أن تقلّل من حدوث الإنذارات الخاطئة في شاشات وحدة العناية المركّزة بنسبة تصل إلى 60% من دون تعريض سلامة المرضى للخطر[50].

* * *

الإنذارات الكاذبة هي فئة فرعية من الأخطاء المعروفة باسم الإيجابيّات الخاطئة. والإيجابيّة الكاذبة، كما يشير الاسم، هي نتيجة اختبار تشير إلى وجود حالة أو سمة معيّنة غير موجودة فعلاً. عادة، تحدث الإيجابيّات الكاذبة في الاختبارات الثنائية، وهي اختبارات ذات نتيجتين محتملتين - إيجابية أو سلبية. في سياق الفحوصات الطبّية، تؤدّي النتائج الإيجابية الخاطئة إلى إخبار الأشخاص السليمين بأنّهم مرضى. فيما تتسبّب الإيجابيّات الخاطئة في قاعة المحكمة بإدانة أشخاص أبرياء بجرائم لم يرتكبوها. (سنتعرّف على العديد من هؤلاء الضحايا في الفصل التالي).

من شأن الاختبار الثنائي أن يخطئ بطريقتين. ويمكن قراءة النتائج الأربع المحتملة للاختبار الثنائي (اثنتان صحيحتان واثنتان خاطئتان) في الجدول 2 أدناه. فبالإضافة إلى الإيجابيات الخاطئة، ثمّة أيضاً سلبيات خاطئة.

الحالة المتوقّعة	**الحالة الحقيقية**	
	إيجابية	**سلبية**
إيجابية	إيجابية صحيحة	إيجابية كاذبة
سلبية	سلبية كاذبة	سلبية صحيحة

الجدول 2: النتائج الأربع المحتملة للاختبار الثنائي.

في سياق تشخيص المرض، قد تفترض أنّ السلبيات الخاطئة أكثر ضرراً، لأنّها تخبر المرضى بأنّهم لا يعانون من المرض الذي يجرون اختباراً له، في حين أنّهم مصابون به في الواقع. سنتعرّف على بعض ضحايا السلبيات الكاذبة لاحقاً في هذا الفصل. غير أنّه من شأن الإيجابيّات الكاذبة أيضاً أن يكون لها مضاعفات مفاجئة وخطيرة، ولكن لأسباب مختلفة تماماً.

الصورة الكبيرة

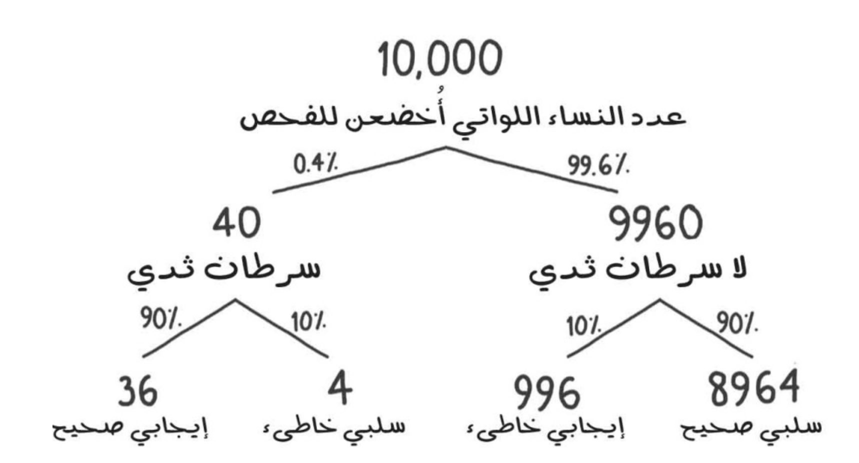
فلنأخذ على سبيل المثال عمليّة كشف الأمراض. تقوم عمليّة الكشف على إجراء اختبار شامل لمرض معيّن على أشخاص لا يعانون من أعراض ظاهرة ولكنّهم ينتمون إلى مجموعة معرّضة بشدّة للخطر. على سبيل المثال، في المملكة المتّحدة، تتمّ دعوة النساء فوق سنّ الـ 50 إلى إجراء فحوصات روتينية للثدي، لكونهنّ عرضة لخطر أعلى للإصابة بسرطان الثدي. غير أنّ الحصول على إيجابيّات كاذبة في برامج الفحص الطبّي حالياً يشكّل موضوع نقاش حادّ.

يبلغ معدّل انتشار سرطان الثدي بين النساء في المملكة المتّحدة نحو 0.2%. هذا يعني أنّه في أيّ وقت من الأوقات، نتوقّع إصابة 20 امرأة بسرطان الثدي بين كلّ 10,000 امرأة على قيد الحياة في المملكة المتّحدة. لا تبدو هذه النسبة مرتفعة جداً، إلّا أنّ السبب في ذلك يعود إلى أنّ سرطان الثدي يُشفى بسرعة في معظم الحالات. وفي الحالات القليلة التي يتأخّر فيها الشفاء، لا يكون فيها العمر المتوقّع طويلاً جداً. في الواقع، تُشخّص امرأة من أصل ثماني نساء بسرطان الثدي خلال حياتها. وفي المملكة المتّحدة، يتمّ تشخيص نحو امرأة من كلّ 10 من هؤلاء النساء في مرحلة متأخّرة (الثالثة أو الرابعة). إلاّ أنّ التشخيص المتأخّر يقلّص بشكل كبير من فرص البقاء على قيد الحياة على المدى الطويل، ممّا يدعم الحجّة التي تعطي أهمّية حيويّة للتصوير الشعاعي المنتظم للثدي، لا سيّما بالنسبة إلى النساء في الفئات العمرية الأكثر عرضة. مع ذلك، ثمّة مشكلة رياضية مع فحوصات كشف سرطان الثدي لا يعرفها معظم الناس.

كاز دانييلز هي أمّ لثلاثة أطفال تعيش في نورثهامبتون. في عام 2010، ذهبت لإجراء صورة شعاعية روتينية للمرّة الأولى في سنّ الـ 50. وبعد أسبوع من موعدها، تلقّت رسالة بريدية تطلب منها العودة لإجراء المزيد من الاختبارات في غضون يومين. بالطبع، ونظراً للاستدعاء الملحّ، شعرت بشيء من الخوف. وعاشت اليومين التاليين بقلق شديد منعها من الأكل أو النوم، وهي تفكّر في العواقب المحتملة للتشخيص الإيجابي.

معظم المريضات اللواتي يخضعن للتصوير الشعاعي للثدي يرينها طريقة دقيقة إلى حدّ ما للكشف عن سرطان الثدي. وفي الواقع، بالنسبة إلى النساء اللواتي يعانين من سرطان الثدي، فإنّ الاختبار يكشف الإصابة في 9 حالات تقريباً من أصل 10. أمّا بالنسبة إلى من لا يعانين من المرض، فإنّ نتائج الاختبار تصدق 9 مرّات من أصل 10 حالات[51]. كانت كاز على علم بهذه الإحصائيّات، وعلى ضوء نتيجة التصوير الإيجابيّة، اعتبرت أنّه من المحتمل أن تكون مصابة بالمرض. مع ذلك، توضح حجّة رياضية بسيطة أنّ العكس هو الصحيح.

إنّ معدل انتشار سرطان الثدي لدى النساء فوق سنّ 50 - اللواتي تتمّ دعوتهنّ لإجراء الفحص الروتيني - هو أعلى بقليل من عامّة الإناث، إذ يبلغ 0.4%. وقد تمّ تفصيل مصير 10,000 من هؤلاء النساء في الشكل 5. يمكننا أن نرى أنّه في المتوسّط، فإنّ 40 امرأة فقط منهنّ مصابة بسرطان الثدي، في حين أنّ 9960 لا يعانين من المرض. مع ذلك، فإنّ امرأة من كلّ 10 نساء، أو 996 من النساء السليمات سيحصلن على تشخيص إيجابي غير صحيح. وبالمقارنة مع 36 امرأة تمّ تشخيص إصابتهنّ بالمرض بشكل صحيح، فهذا يعني أنّ نتيجة الاختبار الإيجابية ستكون صحيحة فقط لدى 36 من أصل 1032 حالة أو 3.48% من الحالات. تُعرف نسبة نتائج الاختبار الإيجابية الصحيحة باسم دقّة الاختبار. من بين 1032 امرأة حصلن على نتيجة إيجابية، فإنّ 36 منهنّ فقط مصابات بالفعل بسرطان الثدي. بعبارة أخرى، إذا أتت نتيجة الصورة الشعاعية إيجابية، فلا يزال الاحتمال كبيراً أنّ صاحبتها لا تعاني من سرطان الثدي. فعلى الرغم من أنّ الاختبار يبدو دقيقاً جدّاً، إلا أنّ انخفاض معدّل انتشار المرض بين السكّان يجعله غير دقيق إلى حدّ بعيد.



الشكل 5: من بين 10,000 امرأة تزيد أعمارهنّ عن 50 عاماً يخضعن للاختبار، تحصل 36 منهنّ على نتيجة إيجابية صحيحة، في حين يتمّ إخبار 996 امرأة أنّهنّ مصابات بالمرض على الرغم من كونهنّ سليمات.

لم تكن كاز المسكينة تعرف ذلك، شأنها شأن كثير من النساء اللواتي يجرين اختبارات كهذه. في الواقع، يعجز كثير من الأطبّاء على تفسير الصور الشعاعية الإيجابية للثدي. لذا، تم في عام 2007 تزويد مجموعة من 160 طبيباً نسائياً بالمعلومات التالية حول دقّة التصوير الشعاعي للثدي وانتشار سرطان الثدي بين السكّان[52]:

- يبلغ احتمال إصابة المرأة بسرطان الثدي 1% (انتشار المرض).

- إذا كانت المرأة مصابة بسرطان الثدي، فإنّ احتمال حصولها على نتيجة إيجابية يبلغ 90%.

- إذا لم تكن المرأة مصابة بسرطان الثدي، فإنّ احتمال حصولها على نتيجة إيجابية على الرغم من ذلك يبلغ 9%.

بعد ذلك، عُرض على الأطبّاء سؤال متعدّد الخيارات يطلب منهم اختيار العبارة التي تصف بشكل أفضل فرص إصابة مريضة بسرطان الثدي بعد حصولها على نتيجة إيجابية للاختبار الشعاعي[53]:

أ. يبلغ احتمال إصابتها بسرطان الثدي نحو 81%.

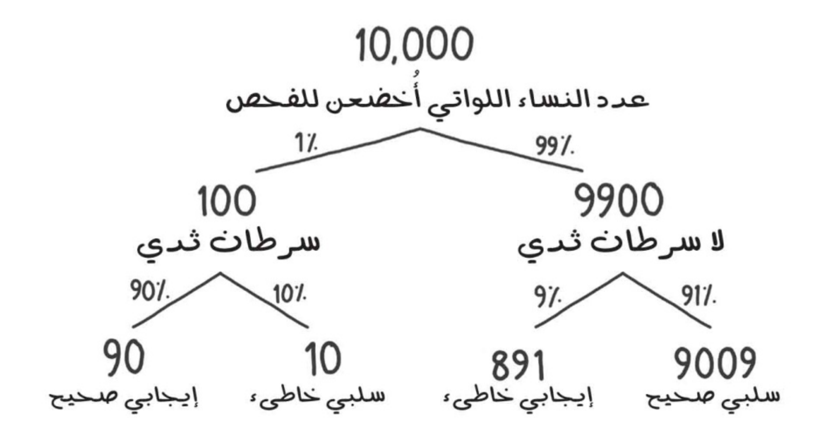
ب. من بين 10 نساء حصلن على نتيجة إيجابية لصورة الأشعّة، نحو 9 يعانين من سرطان الثدي.

ج. من بين 10 نساء حصلن على نتيجة إيجابية لصورة الأشعّة، نحو امرأة واحدة تعاني من سرطان الثدي.

د. يبلغ احتمال إصابتها بسرطان الثدي نحو 1%.

كانت الإجابة الأكثر شيوعاً بين أطبّاء الأمراض النسائية هي الإجابة أ - أي أنّ النتيجة الإيجابية للصورة الشعاعية ستكون صحيحة بنسبة 81% (نحو 8 مرّات من أصل 10). هل هم على حقّ؟ يمكننا في الواقع معرفة الإجابة الصحيحة عبر إلقاء نظرة على شجرة القرارات المحدّثة الموضحة في الشكل 6. على أساس نسبة انتشار المرض البالغة 1%، فإنّ من بين 10,000 امرأة تمّ اختيارهنّ عشوائياً، ستصاب 100 امرأة في المتوسّط بسرطان الثدي. وستعطي صورة الثدي الشعاعية نتيجة إيجابية صحيحة لـ 90 امرأة منهنّ. ومن بين 9900 امرأة لا يعانين من المرض، ستحصل 891 امرأة منهنّ على نتيجة إيجابية غير صحيحة. بالتالي، من بين 981 امرأة ذات نتيجة إيجابية، سيتبيّن أنّ 90 منهنّ فقط - أو ما يقرب من 9% - يعانين بالفعل من المرض. لكن ما يدعو إلى القلق أنّ الأطبّاء النسائيين بالغوا في تقدير القيمة الحقيقية. تمّ اختيار الإجابة الصحيحة من قبل

نحو خُمس المشاركين، وهي نتيجة أسوأ ممّا لو اختار جميع الأطباء من بين الإجابات الأربعة عشوائياً[54].



الشكل 6: من بين 10,000 امرأة افتراضية في السؤال متعدّد الخيارات، ستحصل 90 امرأة على نتيجة إيجابية صحيحة، في حين سيتمّ إخبار 891 أنّهنّ يعانين من المرض على الرغم من كونهنّ سليمات.

لاحقاً، أوضحت فحوصات المتابعة التي أجرتها كاز الأمور، كما هو متوقّع. غير أنّ المصاعب التي مرّت بها تُعتبر نموذجية بالنسبة إلى غالبية النساء اللواتي يحصلن على نتيجة إيجابية لصورة الثدي الشعاعية. ومع التصوير الشعاعي المتكرّر للثدي، وفقاً لتوجيهات معظم برامج الفحص، تزداد فرص الحصول على نتيجة إيجابية خاطئة. فعلى افتراض حدوث إيجابيات كاذبة باحتمال متساوٍ قدره 10% (أو 0.1) في كلّ اختبار، يحدث التشخيص السلبي الصحيح باحتمال 90% (أو 0.9). وبعد سبعة اختبارات مستقلّة، ينخفض احتمال عدم الحصول على نتيجة إيجابية كاذبة (0.9 مضروب بنفسه سبع مرّات، أو 0.9^7) إلى أقلّ من النصف (نحو 0.47). بعبارة أخرى، بعد سبع صور ثدي شعاعية فقط، تصبح المرأة غير المصابة بسرطان الثدي أكثر عرضة للحصول على نتيجة إيجابية زائفة. وبما أنّ الصور الشعاعية للثدي تُطلب كلّ ثلاث سنوات بعد سنّ الخمسين، قد تتوقّع المرأة المشارِكة في برنامج الفحص نتيجة إيجابية كاذبة مرّة واحدة على الأقلّ خلال حياتها.

وهم اليقين

بطبيعة الحال، تثير هذه الإيجابيّات الخاطئة وعالية التردّد تساؤلات حول التوازن بين تكلفة برامج الفحص وفائدتها. فمن شأن المعدّلات المرتفعة للنتائج الإيجابيّة الخاطئة أن يكون لها آثار نفسية ضارّة وأن تؤدّي إلى تأخير أو إلغاء تصوير الثدي بالأشعة السينية في المستقبل. مع ذلك، تتجاوز مشاكل الفحص الإيجابيّات الكاذبة البسيطة. ففي مقالة للمجلة الطبّية البريطانية[55]، اعترف موير غراي، المدير السابق لبرنامج الفحص الوطني في المملكة المتّحدة، بأنّ «جميع برامج الفحص تسبّب الضرر. غير أنّ بعضها مفيد أيضاً، وبعض هذه البرامج المفيدة يفيد أكثر ممّا يضرّ، وبتكلفة معقولة».

تحديداً، يمكن أن يؤدّي الفحص إلى ظاهرة فرط التشخيص. فعلى الرغم من أنّ عدداً متزايداً من حالات السرطان يُكتشف من خلال فحص الثدي، إلّا أنّ العديد من هذه السرطانات صغير جدّاً أو بطيء النموّ بحيث لا يشكّل تهديداً لصحّة المرأة على الإطلاق، ولا يتسبّب في أيّ مشاكل إذا لم يتمّ اكتشافها. مع ذلك، فإنّ اسم المرض بحدّ ذاته يروّع معظم الناس العاديين، بحيث يخضع الكثير منهم، وغالباً بناءً على مشورة طبّية، لعلاج مؤلم أو لعمليّة جراحية بلا داعٍ.

تحيط نقاشات مماثلة ببرامج الفحص الشاملة الأخرى، بما في ذلك اختبار فحص عيّنة من عنق الرحم لكشف سرطان عنق الرحم (وهو مرض سنعود إليه في الفصل 7، للبحث في فاعلية تكلفة ومساواة برامج اللقاحات)، واختبار مستضد البروستات النوعي لسرطان البروستات (PSA)، واختبارات كشف سرطان الرئة. بالتالي، من الأهمّية بمكان أن نفهم الفرق بين اختبارات الكشف والاختبارات التشخيصية. إذ يشبه الكشف عن الأمراض عمليّة البحث عن وظيفة. ذلك أنّ التقدّم الأوّلي للوظيفة يتيح لصاحب العمل وضع قائمة مختصرة للأشخاص الذين يرغب في مقابلتهم بطريقة فاعلة على أساس عدد من الخصائص المرغوبة. بالطريقة نفسها، تمّ تصميم اختبارات الكشف لإلقاء شبكة واسعة وأقلّ تمييزاً على مجموعة كبيرة من السكّان لتحديد الأشخاص الذين لم تظهر لديهم أعراض واضحة بعد. عادة ما تكون الاختبارات أقلّ دقّة، ولكن يمكن تطبيقها بطريقة فاعلة من حيث التكلفة على أعداد كبيرة من الناس. يعمد أرباب العمل إلى استخدام أساليب أكثر كثافة من حيث الموارد والمعلومات، مثل مراكز التقييم وإجراء المقابلات، لتحديد المرشّحين الذين سيتمّ توظيفهم. وبالمثل، بمجرّد اكتشاف مجموعة من الأشخاص بواسطة الاختبار يُحتمل أنّها تعاني من المرض، يمكن متابعة أفرادها من خلال اختبارات تشخيصية أكثر تكلفة، وأكثر دقّة، لتأكيد أو رفض نتائج الفحص الأوّلية. وكما أنّ المتقدّم إلى الوظيفة لا يعتبر أنّه نال المنصب بمجرّد دعوته لإجراء مقابلة، كذلك لا ينبغي أن تفترض أنّك مصاب بمرض ما على أساس نتيجة إيجابيّة لاختبار

الكشف. فعندما يكون معدّل انتشار المرض منخفضاً، تؤدّي عمليات الفحص إلى عدد من النتائج الإيجابيّة الخاطئة يفوق عدد الإيجابيّات الصحيحة.

تعود المشاكل التي تسبّبها الإيجابيّات الخاطئة في اختبارات الكشف الطبّية، جزئيّاً، إلى موقفنا غير المشكّك في دقّة الاختبارات الطبّية. غالباً ما تعرف هذه الظاهرة باسم *وهم اليقين*. إذ نكون في غاية اليأس للحصول على إجابة نهائية، بطريقة أو بأخرى، لا سيّما في المسائل الطبّية، بحيث ننسى أن نتعامل مع النتائج بالقدر المطلوب من الشكّ.

في عام 2006، سئل 1000 شخص بالغ في ألمانيا عمّا إذا كانت سلسلة من الاختبارات قد أعطت نتائج مؤكّدة بنسبة 100 بالمائة[56]. وعلى الرغم من أنّ 56% أشاروا إلى أنّ تصوير الثدي الشعاعي يشتمل على درجة من عدم الدقّة، إلّا أنّ الغالبية العظمى وجدت أنّ اختبارات الحمض النووي، وتحليل بصمات الأصابع، واختبارات فيروس نقص المناعة البشرية تعطي نتائج قاطعة بنسبة 100%، وهو أمر غير صحيح.

في يناير 2013، أمضى الصحفي مارك ستيرن أسبوعاً في الفراش بسبب الحمّى. حجز موعداً مع طبيبه الجديد، الذي وجد أنّ الحلّ الأفضل يقوم على أخذ عيّنة دم وإجراء مجموعة من الاختبارات. بعد بضعة أسابيع، وكان مارك قد شعر بالتحسّن بعد تناول المضادات الحيوية، كان بمفرده في شقّته في واشنطن العاصمة عندما رنّ الهاتف. ردّ على المكالمة، وكان المتّصل طبيبه الذي أراد إخباره بنتائج الاختبار. غير أنّ مارك لم يكن مستعدّاً على الإطلاق للحديث الذي سيدور بينهما.

قال طبيبه: «لقد أتت نتيجة تحليل الامتصاص المناعي المرتبط بالأنزيمات ELISA إيجابية لديك». ثمّ تابع قائلاً: «وعليك المضيّ قدماً بالفحوصات على افتراض أنّك مصاب بفيروس نقص المناعة البشرية». مع أنّ مارك لم يكن على علم بأنّ طبيبه قد أجرى تحليل «إليزا» من أجل فيروس الإيدز (ولا فحص اللطخة الغربية الذي يُجرى من بعده)، إلّا أنّه عند مواجهة هذه الحقيقة وبناء على نصيحة الطبيب، لم يجد من خيار سوى تقبّل صدمة إصابته بفيروس نقص المناعة البشرية. وقبل إنهاء المكالمة، اقترح عليه طبيبه المجيء في اليوم التالي لإجراء الاختبارات التأكيدية.

في صباح اليوم التالي، ذهب مارك إلى قسم الجراحة وقد تملّكه الذعر، والإرباك، والإرهاق من قلّة النوم. وبينما كان الطبيب يسحب الدم من ذراعه من أجل اختبار الحمض النووي الريبي التأكيدي RNA، أكّد قناعته مجدّداً بأنّ مارك مصاب بالفيروس واقترح عليه إجراء فحص مناعي

سريع خلال الجراحة لتأكيد اعتقاده. بينما كان مارك ينتظر بفارغ الصبر مرور أطول 20 دقيقة من حياته حتّى تظهر نتيجة الاختبار، راح يفكّر كيف ستكون حياته مع فيروس نقص المناعة البشرية. ومع أنّ المرض لم يعد يُعتبر عقوبة إعدام كما كان من قبل، إلّا أنّه كان يعرف أنّ التشخيص سيدفعه إلى إعادة تقييم العديد من جوانب حياته، ليس أقلّها كيفيّة التقاطه للفيروس في المقام الأوّل.

مع انتهاء فترة الانتظار المؤلمة، لم يظهر خطّ أحمر في نافذة النتائج. عوضاً عن ذلك، سمحت النافذة بمرور شعاع أمل صغير عبر السحب التي خيّمت على عقل مارك المضطرب. كانت نتيجة الاختبار سلبية. وبعد أسبوعين، استلم مارك نتائج اختبار RNA الأكثر دقّة، والتي أتت سلبية أيضاً. ومع ظهور نتيجة الفحص المناعي السلبية مرّة أخرى، انقشعت السحب مع اقتناع الطبيب أخيراً أنّ مارك ليس مصاباً بفيروس نقص المناعة البشرية.

في الحقيقة، كانت نتائج تحليلَي إليزا واللطخة الغربية الأصليَين غامضة لدى مارك. إذ اشتملت نتائج فحص إليزا على مستويات مرتفعة من الأجسام المضادّة، ممّا يشير إلى نتيجة إيجابية. مع ذلك، في الوقت الذي أُجري فيه الاختبار، كانت اختبارات إليزا تشتمل على معدّلات إيجابية كاذبة بنسبة 0.3 بالمائة[57]. أمّا اختبار اللطخة الغربية، وهو اختبار أكثر دقّة صُمّم لكشف هذه الإيجابيّات الخاطئة، فأشارت نتيجته إلى وجود خطأ مخبري. مع ذلك، أساء طبيب مارك، الذي لم يسبق أن رأى خطأ كهذا من قبل، تفسير النتائج. وربّما تأثّر تشخيصه بمعرفته بنمط حياة مارك، ووضَعَه ضمن الفئة المعرّضة بشكل مرتفع لخطر الإصابة بفيروس نقص المناعة البشرية. بدوره، تأثّر مارك بوهم اليقين، ووثق بحكم طبيبه ودقّة الاختبارات.

اختباران أفضل من واحد

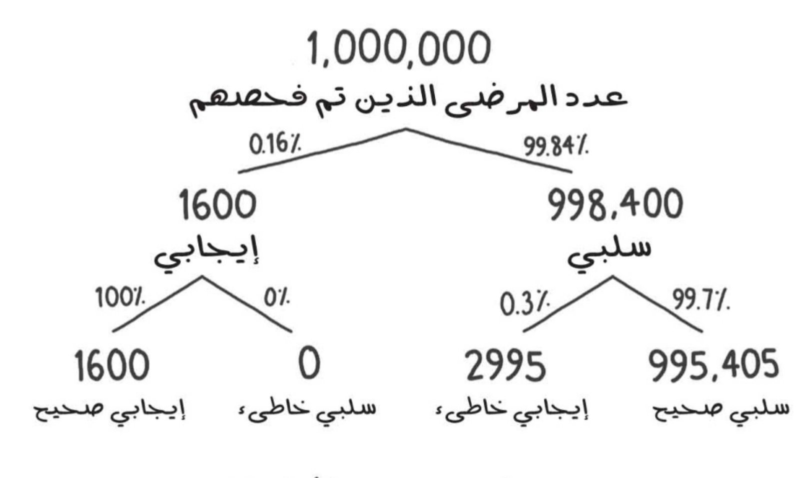
إنّ مفهوم دقّة الاختبارات الثنائية ذات النتيجتين غير مفهوم تماماً من قبل كثيرين. فمن زاوية نسبة السكّان الذين لا يعانون من المرض (وهم عادةً الغالبية العظمى) يمكننا تحديد «دقّة» الاختبار على أنّها نسبة هؤلاء الأشخاص الذين تمّ تحديدهم بشكل صحيح على أنّهم سليمين من المرض - أي «السلبيات الحقيقية». وكلّما ارتفعت نسبة السلبيّات الحقيقية (وبالتالي انخفض معدّل الإيجابيّات الخاطئة)، كان الاختبار أكثر دقّة. في الواقع، تُعرف نسبة السلبيّات الحقيقية باسم «نوعية» الاختبار. فعندما يكون الاختبار نوعياً بنسبة 100%، وحدهم المصابون فعلاً بالمرض سيحصلون نتائج إيجابيّة - ولا توجد إيجابيّات كاذبة.

حتّى الاختبارات النوعية بالكامل لا تضمن كشف كلّ المصابين بالمرض. وربّما يتعيّن علينا تصنيف الدقّة بناءً على وجهة نظر الأشخاص الذين يعانون بالفعل من المرض. فلو كنّا في مكانهم، ألن نعتبر أنّه من المهمّ أن يتمّ الكشف عن مرضنا للمرّة الأولى بواسطة الاختبار؟ بالتالي، ربّما ينبغي أن تكون «دقّة» الاختبار هي نسبة «الإيجابيّات الحقيقية» - أي الأشخاص الذين يعانون من المرض ويتمّ تحديدهم على أنّهم كذلك بشكل صحيح. في الواقع، تُعرف هذه النسبة باسم «حساسية» الاختبار. فالاختبار الذي يتميّز بنسبة حساسية 100% سينبئ بشكل صحيح جميع المصابين بحالتهم.

يتمّ تحديد درجة دقّة اختبار معيّن من خلال حساب عدد النتائج الإيجابيّة الصحيحة وقسمته على العدد الإجمالي للإيجابيّات، سواء كانت صحيحة أم كاذبة. في جزء سابق من هذا الفصل، فاجأنا انخفاض دقّة اختبارات الكشف عن سرطان الثدي، والتي لم تتجاوز 3.48% فقط. مع ذلك، فإنّ مصطلح «الدقّة» يقتصر عادة على عدد الإيجابيات الحقيقية والسلبيات الحقيقية مقسوماً على العدد الإجمالي للأشخاص الذين يجرون الاختبار. وهذا منطقي، لأنّها نسبة المرّات التي يعطي فيها الاختبار النتيجة الصحيحة، إيجابية كانت أم سلبية.

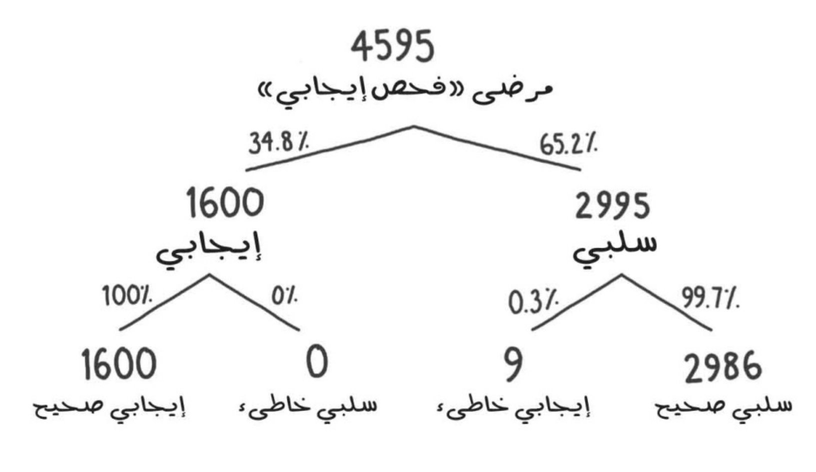
من الصعب أن نحدّد بشكل حاسم معدّلات الخطأ لاختبار «إليزا» المستعمل لكشف فيروس نقص المناعة البشرية والذي فشل مع مارك ستيرن. مع ذلك، توافق معظم الدراسات على نسبةِ نوعيّة تقارب 99.7% ونسبةِ حساسية تكاد تكون 100%. وتشير نتيجة الاختبار السلبية إلى أنّ صاحب العلاقة سليم بالتأكيد من فيروس نقص المناعة البشرية، ولكن في المتوسّط، يحصل 3 من كلّ 1000 شخص غير مصابين بالفيروس على تشخيص إيجابي كاذب. يبلغ معدّل انتشار فيروس نقص المناعة البشرية في المملكة المتّحدة 0.16% فقط. وبالنظر إلى 1,000,000 مواطن بريطاني تمّ اختيارهم عشوائياً كما هو موضح في الشكل 7، فإنّ 1600 منهم في المتوسّط سيكونون مصابين بالفيروس، مقابل 998,400 شخص سليم. ومن بين 998,400 شخص سليم يخضع لاختبار إليزا، حتّى في ظلّ نسبة نوعيّة تصل إلى 99.7%، سيحصل 2995 منهم على تشخيص إيجابي كاذب. تطغى هذه الأرقام الإيجابية الخاطئة على الـ 1600 نتيجة إيجابية حقيقية بواقع اثنين إلى واحد. وكما هو الحال مع فحص الكشف عن سرطان الثدي، بما أنّ معدّل انتشار فيروس نقص المناعة البشرية منخفض، وبما أنّ اختبار إليزا يفتقر إلى قدر ضئيل من النوعيّة، فإنّ نسبة ذوي التشخيص الإيجابي المصابين فعلاً بالمرض (دقّة الاختبار) منخفضة بمعدّل يزيد قليلاً عن الثلث. مع ذلك، فإنّ دقّة الاختبار مرتفعة للغاية. إذ يبلغ عدد النتائج الصحيحة 997,005 (إيجابيّة كانت أم سلبية) لكلّ

مليون شخص يخضعون للاختبار - وهي نسبة دقّة تتجاوز 99.7%. لكن حتّى الاختبارات بالغة الدقّة قد تكون نتائجها غير دقيقة على نحو مثير للقلق.



الشكل 7: من بين 1,000,000 مواطن بريطاني يخضعون لاختبار إليزا، سيتمّ كشف 1600 حالة مصابة فعلاً بفيروس نقص المناعة البشرية، بينما سيحصل 2995 شخصاً على نتيجة إيجابية كاذبة.

تتمثّل إحدى الطرق البسيطة لتحسين دقّة الاختبار في إجراء اختبار ثانٍ. لهذا السبب، يعتبر الاختبار الأوّل للعديد من الأمراض (كما رأينا مع كشف سرطان الثدي) اختبار كشف متدنّي النوعيّة. وهو مصمّم لتسليط الضوء على أكبر عدد ممكن من الحالات المحتملة وتفويت أقلّ عدد ممكن. ويكون الاختبار الثاني تشخيصياً عادة مع درجة نوعيّة أعلى بكثير، ويستبعد غالبية الإيجابيّات الخاطئة. وحتّى في حال عدم توفّر اختبار بنسبة نوعيّة أعلى، فإنّ إعادة إجراء الاختبار نفسه لجميع المرضى ذوي النتائج الإيجابية من شأنه تحسين الدقّة بشكل كبير. بالنسبة إلى اختبار إليزا، فإنّ المحاولة الأولى ترفع بشكل فاعل من نسبة انتشار الأفراد المصابين بفيروس نقص المناعة البشرية بين السكّان الذين تمّت إعادة اختبارهم من 0.16% إلى نحو 34.8%، وهي نسبة دقّة الاختبار الأوّل. وعندما نجري الاختبار مرّة أخرى، كما هو موضّح في شجرة القرار في الشكل 8، يتمّ إخراج غالبية الإيجابيات الخاطئة الأصلية بفضل الدقّة العالية للاختبار، في حين يتمّ تحديد الأفراد الحاملين لفيروس نقص المناعة البشرية بالفعل على أنّهم كذلك. فتتحسّن الدقّة إلى 1600/ 1609، أي ما يعادل 99.4% تقريباً.



الشكل 8: من بين 4595 شخصاً حصلوا على نتيجة إيجابية في الأصل، ستبقى نتائج الأفراد الـ 1600 الحاملين لفيروس نقص المناعة البشرية إيجابية، لكنّ عدد الإيجابيات الخاطئة سينخفض إلى 9 فقط.

* * *

نظريّاً، من الممكن إجراء اختبار يمتاز بالحساسية والنوعيّة التامّة على السواء، اختبار يحدّد جميع الأشخاص الذين يعانون من المرض فقط لا غير. ويمكن اعتبار اختبار كهذا دقيقاً بنسبة 100% بالفعل.

ثمّة سوابق لاختبارات دقيقة تماماً. ففي ديسمبر 2016، قام فريق عالمي من الباحثين بتطوير تحليل دم لمرض كروتزفيلد جاكوب (CJD)[58]. وفي تجربة موجَّهة أُجريت لاختبار اضطراب الدماغ التنكّسي القاتل، الذي يُعتقد أنّه ناجم عن أكل لحم الأبقار المصابة بجنون البقر، تمّ تحديد 32 مريضاً مصاباً بالفعل بالمرض (حساسية كاملة) من دون أيّ إيجابيات كاذبة (نوعية كاملة) بين 391 مشاركاً في التجربة.

مع أنّه ليس من الضروري وجود مفاضلة بين الحساسية والنوعية، إلّا أنّها موجودة في الممارسة عادةً. فالإيجابيّات والسلبيّات الخاطئة مترابطة سلبياً عادة: كلّما قلّت الإيجابيّات الخاطئة، ازدادت السلبيّات الخاطئة والعكس صحيح. في الممارسة، ستجد الاختبارات الفاعلة حدّاً ترسم عنده الخطّ الفاصل بين النوعيّة الكاملة والحساسيّة الكاملة، أي توازن في مكان ما بين الطرفين، أقرب ما يكون إلى كليهما.

يرجع سبب وجود هذه المفاضلة أنّنا نختبر عادةً الوسطاء بدلاً من الظواهر نفسها. فالاختبار الذي أساء تشخيص حالة مارك ستيرن على أنّه مصاب بفيروس نقص المناعة البشرية لا يختبر الفيروس نفسه، بل الأجسام المضادّة التي يرفع الجهاز المناعي للجسم من معدّلها في محاولة لمحاربة الفيروس. مع ذلك، من شأن معدّل الأجسام المضادّة المرتبطة بفيروس نقص المناعة البشرية أن يرتفع نتيجة لحالة بسيطة جدّاً، مثل لقاح الإنفلونزا. كذلك، فإنّ معظم اختبارات الحمل المنزلية لا تبحث عن وجود جنين قابل للحياة مزروع في رحم المرأة، بل تكشف عادة المستويات المرتفعة من هرمون موجِّهة الغدد التناسلية المشيمية البشرية (HCG)، التي يُنتجها الجسم بعد زرع جنين. وغالباً ما تسمّى تلك المؤشّرات الوسيطة علامات بديلة. وتُخطئ الاختبارات لأنّ علامات شبيهة بالعلامات البديلة يمكن أن تؤدّي إلى نتيجة إيجابية.

على سبيل المثال، كانت الاختبارات التشخيصية لمرض كروتزفيلد جاكوب تستند عادة إلى صور الدماغ وفحص الخُزع لقياس التأثير المحتمل على الدماغ للبروتينات الخاطئة التي تشكّل السبب الجذري لهذه الحالة. لكن لسوء الحظّ، فإنّ الخصائص التي يتمّ تقييمها بواسطة هذه الاختبارات تشبه خصائص الأشخاص المصابين بالخرف، لذلك يصعب التوصّل إلى تشخيص واضح. عوضاً عن البحث عن أعراض مختلفة بشكل طفيف قد يتمّ الخلط بينها وبين أعراض أمراض أخرى، يكشف اختبار الدم الجديد لهذا المرض البروتينات المعدية التي تسبّب دائماً هذا المرض. ولهذا السبب، من شأن الاختبار أن يكون قاطعاً: إذا تمّ العثور على البروتينات المشوَّهة، فهذا يعني أنّ المريض مصاب، وإلّا، فهو سليم. بالتالي، عند اختبار السبب الجذري للمرض، عوضاً عن الظواهر المصاحبة له، يكون الأمر بهذه البساطة.

* * *

من الأسباب الشائعة الأخرى لفشل الاختبارات الوسيطة أن يتمّ إنتاج العلامة البديلة نفسها لسبب غير الظاهرة التي نجري الاختبار من أجلها. كانت آنّا هاورد في العشرين من عمرها فقط عندما استيقظت وهي تشعر بالغثيان في صباح أحد أيّام يونيو 2016. كانت آنّا مرتبطة بعلاقة مع كولن منذ تسعة أشهر، لكنّهما لا يحاولان إنجاب طفل. مع ذلك، قرّرت إجراء اختبار الحمل تحسّباً. وفوجئت عندما بدأ الخطّ الأزرق الصغير يظهر ببطء كالسحر وهي تتأمّل الجهاز. صحيح أنّهما لم يخطّطا لهذا الاحتمال، لكنّهما أقنعا نفسيهما أنّهما سيكونان والدين صالحين، وقرّرا الاحتفاظ بالطفل، لا بل بدءا يفكّران في اختيار اسم له.

بعد ثمانية أسابيع من الحمل، أصيبت آنّا بنزيف. فأحالها طبيبها إلى المستشفى لإجراء فحص والتأكّد من وضع الطفل. بعد الفحص، أخبر الأطبّاء آنّا أنّها تُجهض. وطلبوا منها العودة في اليوم التالي لإجراء مزيد من الاختبارات التأكيدية. لكن في اليوم التالي، أظهر اختبار الهرمونات، الذي لا يختلف عن اختبار الحمل المنزلي، أنّ مستويات هرمون موجِّهة الغدد التناسلية المشيمية البشرية، أي «هرمون الحمل»، لا تزال مرتفعة بما فيه الكفاية للإشارة إلى أنّ الحمل قابل للحياة. هكذا، أبلغها الأطبّاء أنّ تشخيص الإجهاض كان خاطئاً.

بعد أسبوع، بدأت آنّا تنزف مجدّداً وعانت من الألم الشديد، فعادت إلى المستشفى. هذه المرّة، خشي الأطبّاء أن يكون الحمل خارج الرحم، فأجروا فحصاً على جهازها التناسلي باستخدام كاميرا الألياف الضوئية. لحسن الحظّ، لم يعثروا على دليل على نموّ جنين خارج الرحم، لكنّ ما ينمو في رحم آنا لم يكن جنيناً أيضاً. فبدلاً من حملها بطفل سليم، كانت آنّا تعاني من ورم الأرومة الغاذية الحملي (GTN)، وهو ورم سرطاني ينمو في الرحم. كان الورم ينمو بنفس معدّل نموّ الجنين ويُنتج هرمون الحمل، وهو المؤشّر غير المباشر على وجود الحمل، الأمر الذي أدّى إلى نتائج حمل خادعة أوهمت آنّا والأطبّاء على السواء أنّ السرطان الذي يهدّد حياتها كان طفلاً سليماً وطبيعياً.

على الرغم من أنّ الورم الذي أصاب آنّا نادر، إلّا أنّه ثمّة أنواع أخرى من الأورام القادرة أيضاً على التسبّب بنتائج حمل خادعة من خلال إنتاج المؤشّر البديل المتمثّل في هرمون الحمل. في الواقع، يشير المركز الخيري لرعاية ودعم المصابين بالسرطان (Teenage Cancer Trust) أنّه قد تمّ استخدام اختبارات الحمل للمساعدة في تشخيص سرطان الخصية خلال العقد الماضي على الأقلّ. ومع أنّ أقلّية صغيرة من أورام الخصية ستتسبّب في ظهور نتيجة إيجابية، إلّا أنّه في هذه الحالات، تعني النتائج الإيجابية، التي هي نتائج حمل كاذبة حتماً، أنّ ارتفاع مستويات هرمون الحمل يشير على الأرجح إلى وجود ورم.

من الواضح إذاً أنّه من شأن اختبارات الحمل إعطاء نتائج إيجابية كاذبة (مفيدة للغاية في بعض الحالات). مع ذلك، من شأن مستويات هرمون الحمل في البول أن تكون منخفضة للغاية بحيث تعطي هي الأخرى سلبيات كاذبة. وقد يكون لاختبارات الحمل السلبية الكاذبة، وإن تكن أقلّ شيوعاً من الإيجابيات الكاذبة، آثار سلبية هامّة على النساء. ففي إحدى الحالات، أجهضت امرأة بعد أن خضعت لجراحة ما كانت لتجريها لو علمت أنّها حامل[59]. ولم تكشف تحاليل البول حملاً خارج الرحم لدى امرأة أخرى، ممّا أدّى إلى تمزّق قناة فالوب وحدوث نزيف هدّد حياتها[60].

* * *

في معظم الحالات، بمجرّد التثبّت من الحمل، أي بعد نحو 12 أسبوعاً في المملكة المتّحدة، نتخلّى عن العلامات الهرمونية الوسيطة لصالح التصوير بالموجات فوق الصوتية، الذي يُظهر بشكل مباشر وجود جنين ينمو في الرحم. مع ذلك، نادراً ما يكون الغرض من التصوير بالموجات فوق الصوتية هو التأكّد من الحمل، بل التحقّق من نموّ الجنين بشكل طبيعي. ومن الاختبارات التي تُجرى في هذه المرحلة، الفحص القفوي. صُمّم هذا الفحص للكشف عن تشوّهات القلب والأوعية الدموية لدى الجنين النامي، والتي ترتبط عادة بتشوّهات في الكروموسومات مثل متلازمة باتاو، ومتلازمة إدوارد، ومتلازمة داون. فبالنسبة إلى معظم الأشخاص، يتكوّن الحمض النووي من 23 زوجاً من الكروموسومات. أمّا في الحالات الثلاث التي يختبرها الفحص القفوي، فيشتمل أحد الأزواج على كروموسوم إضافي، أي أنّه كروموسوم ثلاثي أو ما يسمّى بالتثلّث الصبغي.

لا يُعتبر الفحص القفوي بسيطاً بقدر الاختبار الثنائي. فهو لا يؤكّد بشكل قاطع ما إذا كان الجنين مصاباً بمتلازمة داون. بدلاً من ذلك، يقدّم الفحص للوالدين تقييماً لدرجة خطورة الحالة. مع ذلك، وبناءً على هذا الفحص، تُصنَّف حالات الحمل بوضوح ضمن عالية الخطر أو منخفضة الخطر، ويُستخدم هذا التمييز عند نقل نتائج الاختبار إلى الوالدين. بالتالي، إذا تمّ تصنيف الجنين على أنّ خطر إصابته بمتلازمة داون منخفض (أي أقلّ من 1 من كلّ 150)، فلا يتمّ إجراء مزيد من الاختبارات. أمّا إن صُنّف الطفل في الفئة عالية الخطورة، فغالباً ما يقترح الطبيب إجراء فحص أكثر دقّة للسائل الأمنيوسي. فيتمّ استخراج عيّنة من السائل الذي يحتوي على خلايا جلد الجنين من الكيس الأمنيوسي المحيط به بواسطة إبرة. غير أنّ ثقب الرحم والكيس الأمنيوسي يشتمل على خطر التسبّب بالإجهاض. فما يتراوح بين 5 إلى 10 من بين كلّ 1000 حالة حمل يتمّ اختبارها بفحص السائل الأمنيوسي تنتهي بالإجهاض. غير أنّ ارتفاع نسبة نوعيّة الاختبار تجعل نسبة الخطر مقبولة لدى كثير من الأهل. إذ يعطي الاختبار نتيجة أكثر دقّة من التصوير لأنّه يكشف بوضوح الكروموسوم الزائد في الحمض النووي للطفل (المستخرج من خلايا جلد الجنين) بدلاً من العلامة البديلة. فيستبعد الإيجابيّات الخاطئة من الاختبار الأوّل ويزوّد الوالدين بنتيجة إيجابية حقيقية لاتّخاذ قرار مستنير بشأن الحفاظ على الحمل. أمّا الحالات التي تُفلت من ذلك فهي السلبيات الكاذبة، أي الآباء والأمّهات الذين يتمّ إخبارهم بشكل خاطئ أنّ خطر إصابة الجنين بمرض داون منخفض، ولا تُعرض عليهم اختبارات إضافية.

عاشت فلورا واتسون وآندي بوريل تجربة مشابهة. ففي عام 2002، بعد أن شعرت فلورا بالقلق في الأسبوع الرابع من حملها الثاني، قرّرت أن تتكبّد كلفة إجراء الفحص القفوي الجديد نسبيّاً في الأسبوع العاشر من الحمل سرّاً. بعد صورة الموجات ما فوق الصوتية، تمّ إخبار فلورا أنّه ثمّة احتمال منخفض للغاية أن يكون الجنين مصاباً بمتلازمة داون. لا بل في الواقع، تمّت مقارنة إنجاب طفل مصاب بمرض داون باحتمال الفوز باليانصيب، أي نحو 1 من 14 مليوناً. وهذا مطمئن أكثر ممّا يتوقّع معظم الآباء من هذا النوع من الاختبارات. فاطمأنّت فلورا أنّها لا تحتاج إلى إجراء عمليّة فحص السائل الأمنيوسي الخطرة لتأكيد نتيجة الفحص القفوي. وعوضاً عن ذلك، قرّرت الاستمرار في استعداداتها لاستقبال طفلها الثاني بحماسة.

مع ذلك، قبل خمسة أسابيع من موعد الولادة، لاحظت وجود خطب. إذ بدأت حركة الجنين تقلّ تدريجيّاً. وبعد ثلاثة أسابيع، دخلت المستشفى لكي تضع كريستوفر. ولد بسرعة، بعد نصف ساعة فقط من وصولها إلى المستشفى. وعندما خرج إلى النور، كان أرجوانياً ومتشنّجاً بحيث ظنّت أنّه ميت. طمأنتها الممرضات وهي وآندي أنّ الطفل على قيد الحياة، لكنّ الأخبار التي تلقّياها بعد ذلك ستغيّر مستقبل أسرتهما.

كان كريستوفر يعاني من متلازمة داون. عند سماع الخبر، خرج آندي من الغرفة وانفجرت فلورا باكية. هكذا تحوّلت فرحتهما إلى صدمة. وخلال الساعات الأربع والعشرين التالية، تروي فلورا قائلة، «لم أستطع لمسه أو الاقتراب منه». هكذا بقي كريستوفر وحيداً في الليلة الأولى من حياته، متروكاً لرعاية الممرضات. وعندما أتت بقيّة الأسرة لاستقبال المولود الجديد، ساءت الأمور أكثر. كان والد آندي قد ربّى ابناً يعاني من صعوبات في التعلّم، فما كان منه إلّا أن حثّهما على ترك كريستوفر في المستشفى. أمّا والدة فلورا فلم تنظر حتّى إلى الطفل.

كانت الحياة التي تنتظرهما عندما أحضرا كريستوفر إلى المنزل مختلفة تماماً عن تلك التي تطلّعا إليها طوال الأشهر السابقة، عندما استلما نتيجة الفحص القفوي. تأقلمت العائلة بأكملها لاحقاً مع حالة كريستوفر، لكنّ ضغوط رعاية طفل معوّق كانت لها خسائرها. فنتيجة الضغوط والإرهاق تأثّرت علاقة فلورا وآندي، وانتهت بالانفصال. تصرّ فلورا على أنّها ما كانت لتجهض لو تمّ تشخيص إصابة كريستوفر بمتلازمة داون في وقت سابق. مع ذلك، لا تزال تشعر بالغضب لأنها حُرمت من فرصة التأقلم مع هذا الواقع والاستعداد لحالة ابنها. هذه الشكوى سنسمعها مرّة أخرى في الفصل 6 عندما نكتشف مخاطر التشخيص الخوارزمي الآلي. فربّما كان من الممكن تجنّب الصدمة والحزن اللذين أصابا الأسرة بعد ولادة كريستوفر لولا نتيجة الاختبار السلبية الكاذبة.

* * *

سواء أعجبنا ذلك أم لا، فلا مفرّ من الإيجابيّات والسلبيّات الكاذبة. صحيح أنّه من شأن الرياضيّات والتكنولوجيا الحديثة أن تساعدنا في حلّ بعض هذه المشاكل بواسطة أدوات مثل الغربلة في البداية، لكن ثمّة مشاكل أخرى علينا التعامل معها بأنفسنا. يجب أن نتذكّر أنّ اختبارات الكشف ليست اختبارات تشخيصية، وأنّ نتائجها يجب أن تؤخذ بشيء من الحذر. هذا لا يعني أن نتجاهل تماماً النتيجة الإيجابية لاختبار الكشف، بل أن ننتظر نتائج اختبارات المتابعة الأكثر دقّة قبل أن نستسلم للقلق. وينطبق الأمر نفسه على الاختبارات الجينية الشخصية. إذ تتفاوت فئات الخطر التي يوضع فيها الشخص من شركة إلى أخرى ولا يمكن أن تكون جميعها صحيحة. فكما وجد مات فيندر عندما حصل على تشخيص إصابته بمرض ألزهايمر، من شأن اختبار ثانٍ أن يساعد على تقديم إجابة أكثر تحديداً.

بالنسبة إلى بعض الاختبارات، لا تتوفّر أنواع أكثر دقّة. في هذه الحالات، يجب أن نتذكّر أنّ إجراء الفحص نفسه مرّة ثانية من شأنه تحسين دقّة النتائج بشكل كبير. ولا يجب أن نتردّد أبداً بطلب رأي ثانٍ. إذ من الواضح أنّ الأطبّاء أنفسهم، وهم خبراء في مجالاتهم، لا يتوصّلون دائماً إلى فهم دقيق للأرقام، على الرغم من هالة الثقة التي تحيط بهم. بالتالي، قبل أن ينتابك القلق بلا داعٍ بناءً على تأكيدات نابعة من اختبار واحد، حاوِل أن تعرف نسبة حساسيته ونوعيته، لمعرفة درجة انعدام الدقّة. تحقّق من وهم اليقين، واستعد زمام السيطرة على سلطة تفسير النتيجة. وكما سنرى في الفصل التالي، فإنّ عدم التحقّق من صحّة الأرقام، لا سيّما تلك التي تستغلّ قوانين الرياضيّات، قد أوصل أكثر من شخص إلى باب السجن ظلماً.

3
قوانين الرياضيّات:
دور الرياضيّات في القانون

دخلت سالي كلارك إلى غرفة النوم في منزلها بعد أن غادرها زوجها ستيف، قبل دقائق، تاركاً ابنهما الرضيع هاري، البالغ من العمر ثمانية أسابيع، نائماً. فجأة بدأت بالصراخ عندما رأت الطفل في كرسيّه النطّاط، أزرق اللون ولا يتنفّس. على الرغم من محاولات زوجها وطاقم الإسعاف إنعاش الطفل، إلّا أنّ وفاته أعلنت بعد أكثر من ساعة بقليل. كانت تلك مأساة مروّعة بالنسبة إلى أيّ أمّ حديثة، فما بالك بسالي كلارك التي تخسر ابنها الثاني بالطريقة نفسها.

قبل أكثر من عام بقليل، غادر ستيف منزله في ويلمسلو، ضاحية مانشستر، لحضور عشاء نظّمه القسم الذي يعمل فيه بمناسبة الميلاد. وضعت سالي ابنهما كريستوفر، البالغ من العمر 11 أسبوعاً، في سلّته وكانت بمفردها معه ذلك المساء. بعد نحو ساعتين، وجدت كريستوفر فاقداً للوعي ورماديّ اللون، فاتّصلت فوراً بالإسعاف. لكن على الرغم من الجهود التي بذلها الفريق، لم يستيقظ كريستوفر. وعزا التحقيق الذي أجري بعد ثلاثة أيام الوفاة إلى عدوى في الجهاز التنفسي السفلي.

غير أنّه بعد وفاة هاري، أعيد التدقيق في نتائج فحص جثّة كريستوفر. وتمّ تفسير شقّ في الشفة وكدمات في الساقين بطريقة أكثر شؤماً، بعدما اعتُبرت في الأساس أنّها ناتجة عن محاولات الإنعاش. وعندما أعيد تحليل عيّنات أنسجة كريستوفر المحفوظة، ظهرت أدلّة على حدوث نزيف في الرئتين قبل الوفاة، وهو أمر فوّته الفحص الأوّل، ممّا أدّى بالطبيب الشرعي إلى اقتراح احتمال تعرّض الطفل للخنق.

أشار فحص جثّة هاري إلى وجود نزيف في شبكية العين، وتلف في العمود الفقري، ودموع في أنسجة المخّ: وهي مؤشّرات رئيسة على أنّ هاري قد تعرّض للاهتزاز حتّى الموت. وعند أخذ الفحصين بعين الاعتبار، وجدت الشرطة أدلّة كافية لاعتقال سالي وستيف كلارك. قرّرت النيابة العامّة للتاج البريطاني عدم مقاضاة ستيف (لأنّه لم يكن حاضراً عندما توفّي كريستوفر)، في حين اتُّهمت سالي بقتل ولديها.

ستقع المحاكمة التي تلت ذلك ليس في خطأ واحد، بل في أربعة أخطاء رياضية، ستساهم في ما يشار إليه غالباً أنّه أسوأ إخفاق للعدالة البريطانية. فمن خلال سرد قصّة سالي في هذا الفصل، سنتطرّق للأخطاء المأساوية أحياناً، والشائعة جدّاً التي يمكن أن تقع فيها المحاكم نتيجة أخطاء رياضية. وخلال ذلك، سنلتقي بالمشاركين في مآسٍ مشابهة: المجرم الذي ألغيت إدانته بناء على تقنية رياضية، والقاضي الذي ساهم سوء فهمه الرياضي في إطلاق سراح أماندا نوكس، الطالبة الأميركية المتّهمة بالقتل. لكن أوّلاً، سنطّلع على قضيّة الضابط العسكري الفرنسي الذي تمّ نفيه إلى معسكر سجن وحشي عقاباً على جريمة لم يرتكبها.

قضية دريفوس

للرياضيّات في قاعة المحكمة تاريخ طويل وغير مشرّف. فقد كان أوّل (سوء) استخدام بارز لها في فضيحة سياسية قسمت الجمهورية الفرنسية وأصبحت معروفة في جميع أنحاء العالم باسم «قضية دريفوس». ففي عام 1894، وجدت عاملة تنظيف فرنسية تعمل سرّاً في السفارة الألمانية في باريس، مذكّرة مهملة. أدّى اكتشاف الرسالة المكتوبة بخطّ اليد، والتي تقدّم أسراراً عسكرية فرنسية إلى الألمان، إلى البحث عن جاسوس ألماني محتمل وسط الجيش الفرنسي. وتُوّج البحث بالقبض على الضابط المدفعي اليهودي الفرنسي، النقيب ألفريد دريفوس.

في المحكمة العسكرية التي عُقدت، لم تقتنع الحكومة الفرنسية برأي خبير الخطّ اليدوي الذي اشتبه في أنّ دريفوس بريء، بل استشارت ألفونس بيرتيون، وكان شخصاً غير كفوء يحتلّ منصب رئيس مكتب تحديد الهوية في باريس. زعم بيرتيون أنّ دريفوس كتب الملاحظة لجعل الخطّ يبدو كأنّه تزوير لخط يده، وهي ممارسة معروفة باسم التزوير الذاتي. وشرع بيرتيون في إعداد تحليل رياضي صعب يستند إلى سلسلة من أوجه التشابه في ضربات القلم للكلمات متعدّدة المقاطع المتكرّرة في المذكّرة. وادّعى أنّ احتمال وجود تشابه بين جرّات القلم في بدايات أو نهايات أيّ زوج من الكلمات المتكرّرة يبلغ 1/ 5. ثمّ تابع حساباته قائلاً إنّ احتمال المصادفات الأربع التي اكتشفها من بين الـ 26 بداية ونهاية للكلمات الـ 13 متعدّدة المقاطع المتكرّرة كان 1/ 5 مضروباً بنفسه أربع مرّات - ما يعادل 16 بالـ 10,000 فقط - ممّا يجعل حدوثها بمحض الصدفة يبدو غير مرجّح إطلاقاً. واقترح بيرتيون أنّ أوجه التشابه ليست مصادفات، بل «لا بدّ أن تكون قد تمّت عمداً وبعناية، وتشير بالتالي إلى نيّة هادفة، وربّما إلى شفرة سرّية على الأرجح»[61]. كانت حجّته كافية لإقناع هيئة المحلّفين المؤلّفة من سبعة رجال، أو على الأقلّ إرباكها. فأُدين دريفوس وحُكم عليه

بالسجن مدى الحياة في حبس انفرادي في المستعمرة الجزائية النائية على جزيرة الشيطان، الواقعة على بعد عدّة أميال من ساحل غويانا الفرنسية.

كانت حجّة بيرتيون الرياضية في ذلك الوقت من الغموض بمكان إلى حدّ أنّه لا فريق الدفاع عن دريفوس، ولا المفوّض الحكومي الحاضر في المحكمة، فقهوا منها شيئاً. ومن المحتمل أن يكون القضاة الذين ترأّسوا المحكمة قد شعروا بنفس القدر من الإرباك، لكنّ الحجج الرياضية الزائفة أرهبتهم ومنعتهم من فعل شيء حيال ذلك. واحتاج إلغاء حسابات بيرتيون الغامضة إلى هنري بوانكاريه، أحد علماء الرياضيّات الأكثر شهرة في القرن التاسع عشر (والذي سنصادفه مرّة أخرى في الفصل السادس مع مشكلة المليون دولار). فبعد مرور أكثر من عقد على الإدانة الأصلية، سرعان ما اكتشف بوانكاريه الخطأ في حسابات بيرتيون. إذ بدلاً من حساب احتماليّة الأربع مصادفات في قائمة الـ 26 بداية ونهاية من الكلمات الـ 13 المتكرّرة، حسب بيرتيون احتماليّة الأربع مصادفات في أربع كلمات، وهو بطبيعة الحال أقلّ احتمالاً بكثير.

قياساً، تخيّل أنّك تتفحّص الأشكال الشبيهة بالأشخاص التي تثبّت أمام المتدرّبين على الرماية. عند العثور على 10 طلقات إمّا على الرأس أو الصدر، قد تفترض أنّ الرامي ماهر. أمّا إذا وجدت أنّ الجولة تضمّنت إطلاق 100 أو حتى 1000 طلقة، فإنّك ستكوّن انطباعاً مختلفاً. ينطبق الشيء نفسه على تحليل بيرتيون. من غير المحتمل بالفعل حدوث أربع مصادفات من أربعة احتمالات، ولكن ثمّة 14,950 طريقة مختلفة لانتقاء أربعة خيارات من 26 بداية ونهاية للكلمات التي حلّلها بيرتيون. كان الاحتمال الحقيقي للمصادفات الأربع التي رصدها بيرتيون يبلغ نحو 18 من 100، أي أكبر بـ 100 مرّة من الرقم الذي استخدمه لإقناع هيئة المحلّفين. وعندما نأخذ في الاعتبار حقيقة أنّ بيرتيون كان سيسرّ أيضاً بالعثور على خمس، أو ستّ، أو سبع مصادفات أو أكثر، يمكننا إعادة حساب احتمال العثور على أربع مصادفات أو أكثر بنحو 8 من 10. في الواقع، يُعَدّ العثور على ما اعتبره بيرتيون عدداً «غير اعتيادي» من المصادفات أكثرَ احتمالاً من عدم العثور عليها. ومن خلال كشف خطأ حسابات بيرتيون واعتبار حتّى محاولة تطبيق نظريّة الاحتمالات على مثل هذه القضيّة أمراً غير مشروع، تمكّن بوانكاريه من فضح تحليل خطّ اليد الشاذّ وبذلك تبرئة دريفوس[62]. بعد معاناة دامت أربع سنوات من الظروف التي لا تطاق في جزيرة الشيطان، وسبع سنوات أخرى من العيش في الخزي في فرنسا، تمّ إطلاق سراح دريفوس أخيراً في عام 1906، وترقيته إلى رتبة رائد في الجيش الفرنسي. وبعد أن استعاد شرفه، تابع ببراعة كبيرة خدمة بلده في الحرب العالمية الأولى، وتميّز على خطّ المواجهة في فردان.

توضح قضيّة دريفوس قوّة الحجج المدعومة رياضياً والسهولة التي يمكن بها إساءة استخدامها. وسوف نعود إلى هذا الموضوع عدّة مرّات في الفصول القادمة، أي ميل الرؤوس إلى الإيماء بهدوء عند عرض صيغة رياضية، من دون طلب مزيد من التوضيح، احتراماً للعالِم الذي ابتدعها. فالغموض الذي يحيط بالعديد من الحجج الرياضية هو المسؤول، جزئيّاً، عن حصانتها وما تناله من إعجاب، نادراً ما تستحقّه. هكذا، قليلاً ما يتمّ تحدّي هذه الحجج. فالشكل الرياضي من وهم اليقين (الظاهرة التي صادفناها في الفصل السابق، والتي تدفع الناس إلى قبول نتائج الاختبارات الطبّية بدون تشكيك) يعطّل المشكّكين المحتملين. والمأساة الحقيقية أنّنا فشلنا في تعلّم دروس من محاكمة دريفوس ومن العديد من الإخفاقات الرياضية الأخرى للعدالة عبر التاريخ. ونتيجة لذلك، عانى ضحايا أبرياء من المصير نفسه مراراً وتكراراً.

مذنب حتّى تثبت براءته؟

كما رأينا في الفحوصات الطبّية في الفصل السابق، فإنّ القانون مليء بالحالات التي يجب فيها إصدار أحكام ثنائية: سواء صحيحة أو خاطئة، وحقيقية أو زائفة، وسواء بالبراءة أو بالإدانة. تلتزم قاعات المحاكم في العديد من الديمقراطيات الغربية بمبدأ «بريء حتّى تثبت إدانته» - ما يعني أنّ عبء الإثبات يقع على عاتق المتّهِم، لا المتّهَم. وقد تخلّصت جميع البلدان تقريباً من الافتراض المعاكس، أي «مذنب حتّى تثبت براءته»، وهي ممارسة تؤدّي حتماً إلى عدد أكبر من النتائج الإيجابية الكاذبة وعدد أقلّ من النتائج السلبية الكاذبة. مع ذلك، ترجح في بعض بلدان العصر الحديث كفّة الإدانة على كفّة البراءة في ميزان العدالة. على سبيل المثال، يبلغ معدّل الإدانة في نظام العدالة الجنائية الياباني 99.9%، ومعظم هذه الإدانات مدعوم باعتراف[63]. وعند المقارنة، نجد أنّه في عام 2017/ 2018، بلغت نسبة الإدانة لدى محكمة التاج في المملكة المتّحدة 80%. بالتالي، يبدو معدّل الإدانة المرتفع في اليابان إحصائيّة مثيرة للإعجاب، لكن هل يُحتمل أن توقف الشرطة اليابانية المجرم الصحيح في أكثر من 999 من كلّ 1000 حالة؟

يعزى هذا المعدّل العالي من الإدانة، جزئيّاً، إلى أساليب الاستجواب القاسية التي يمارسها المحقّقون اليابانيون. إذ يُسمح لهم روتينياً باحتجاز المشتبه بهم لمدّة تصل إلى ثلاثة أيّام من دون تهمة، ويمكنهم استجوابهم من دون حضور محام، ولا يُطلب منهم تسجيل الاستجوابات. وهذه الأساليب هي بدورها نتيجة للنظام القانوني الياباني، الذي يعدّ فيه إثبات الدافع من خلال الاعتراف شرطاً مهمّاً للغاية للحصول على حكم بالإدانة. يضاف إلى ذلك الضغط الذي يمارسه الرؤساء على

المحقّقين لانتزاع الاعترافات قبل التحقيق الفعلي في الأدلّة المتعلّقة بالقضية. وما يسهّل مهمّتهم الرغبة الظاهرية للعديد من المشتبه بهم اليابانيين في الاعتراف، وذلك لتجنّب العار الذي يلحق بعائلاتهم نتيجة محاكمة كبيرة. وقد برز مؤخّراً انتشار الاعترافات الكاذبة في النظام القضائي الياباني نتيجة اعتقال أربعة أشخاص أبرياء بتهمة توجيه تهديدات خبيثة عبر الإنترنت. فقبل أن يتمّ القبض على مرتكب الجريمة الحقيقي، أُرغم اثنان من المتّهمين على تقديم اعترافات كاذبة.

تفضيل اليابان افتراض الإدانة هو استثناء ملحوظ. إذ تُعتبر فرضيّة «براءة المتّهم حتّى تثبت إدانته» قويّة في معظم أنحاء العالم، بحيث تمّ تأكيدها كحقّ من حقوق الإنسان الدولية في الإعلان العالمي لحقوق الإنسان الصادر عن الأمم المتّحدة. حتّى أنّ القاضي والسياسي الإنكليزي وليام بلاكستون الذي عاش في القرن الثامن عشر ذهب إلى أبعد من ذلك وأسبغ على المبدأ صفةً كمّية حين أشار: «من الأفضل فرار عشرة مذنبين على معاناة بريء واحد». ويضعنا هذا الرأي بقوّة في معسكر النتيجة السلبية الكاذبة، وتبرئة أشخاص من الممكن أن يكونوا قد ارتكبوا جريمة، لكن تعذّر إثبات إدانتهم. وحتّى عند توفّر دليل على إدانة المتّهم، فغالباً ما يفلت هذا الأخير من العقاب إذا لم يقنع الدليل هيئة المحلّفين أو القضاة من دون أدنى شكّ. في المحاكم الاسكتلندية، يتمّ اللجوء إلى حُكم ثالث يخفض من معدّل السلبيّات الكاذبة، وإن بالاسم فقط. فيطبّق حكم «غير مثبت» على أحكام البراءة التي لا يكون فيها القاضي أو هيئة المحلّفين على قناعة تامّة ببراءة المتّهم لإعلان براءته. وفي هذه الحالات، على الرغم من أنّ المتّهم يبقى بريئاً، إلّا أنّ الحكم نفسه لا يكون خاطئاً.

73 مليوناً إلى واحد

في محاكمة سالي كلارك في قاعة محكمة إنكليزية، صعّبت الأدلّة المتضاربة على هيئة المحلّفين عمليّة التوصّل إلى إدانة أو تبرئة واضحة. كانت سالي مصرّة على أنّها لم تقتل طفلَيها. غير أنّ أخصّائي علم الأمراض في وزارة الداخلية والشاهد الخبير لدى النيابة، د. آلان ويليامز، ادّعى خلاف ذلك. وكانت الأدلّة الجنائية الطبّية التي قدّمها معقّدة ومربكة بالنسبة إلى هيئة المحلّفين. في الفترة التي سبقت المحاكمة، كذّب خبراء مستقلّون الأدلّة المتعلّقة بالدموع الموجودة في الدماغ، وإصابات العمود الفقري، ونزيف شبكية العين التي «وجدها» ويليامز في الأساس في نتائج فحص جثّة هاري. فما كان من الادّعاء إلّا أن بدّل موقفه وحاول إقناع هيئة المحلّفين بأنّ هاري خُنق حتّى الموت، ولم يتعرّض للاهتزاز كما زُعم في الأصل. وحتّى ويليامز غيّر رأيه. غير أنّ لا شيء في الأدلّة الطبّية كان واضح المعالم.

علاوة على ذلك، أدّت المنافسة الشرسة بين الدفاع والادّعاء على الأدلّة الظرفية المحيطة بحالتَي الوفاة إلى إثارة عاصفة من الإرباك. فقد رسم الادّعاء صورة لسالي على أنّها امرأة عاملة مغرورة وأنانية، استاءت من التغييرات التي جلبها الطفلان إلى أسلوب حياتها وجسدها. وصوّرها على أنّها امرأة يائسة للغاية للعودة إلى حياتها السابقة، الأمر الذي دفعها إلى قتل طفلَيها الرضيعين. فردّ الدفاع، لماذا إذاً أنجبت طفلاً ثانياً بعد الأوّل بفترة وجيزة، ولماذا حملت وأنجبت طفلاً ثالثاً خلال الإعداد للمحاكمة؟ وأكّد الدفاع أنّ سالي كانت مفجوعة بوضوح على وفاة ابنها الأوّل. فتحايل الادّعاء على هذه الحجّة، وألمح إلى وجود شيء مريب في حزنها العلني. عندئذٍ ردّ الطبيب الذي كان أوّل من رأى كريستوفر عند وصوله إلى المستشفى أنّه ما من شيء غير عادي في حزن سالي بعد أن فقدت طفلها البكر. وتوالت الحجج المؤيّدة والمعارضة، لتزيد من حيرة المحلّفين وعجزهم عن رؤية الحقيقة.

في ظلّ هذه الأجواء من الالتباس، تدخّل الشاهد الخبير، السير روي ميدو. فبينما جادل علماء الأمراض حول امتداد «النزيف الرئوي» و«الورم الدموي تحت الجافية»، قاد ميدو هيئة المحلّفين بعيداً عن الحيرة والارتباك، نحو سلامة الحكم، ومع منارة واضحة، ألا وهي إحصائيّة واحدة. فأفاد أنّ فرصة إصابة طفلين من عائلة ثرية بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ (والتي غالباً ما يشار إليها بالموت في المهد) كانت واحدة من بين 73 مليوناً. وبالنسبة إلى كثير من المحلّفين، كانت هذه أهمّ معلومة حصلوا عليها خلال المحاكمة، ذلك أنّ 73 مليوناً كان عدداً كبيراً جدّاً ولا يمكن تجاهله.

في عام 1989، كان ميدو طبيب أطفال بريطانياً بارزاً. فألّف كتاباً بعنوان ألفباء إساءة معاملة الأطفال *ABC of Child Abuse*. وتضمّن الكتاب القول المأثور الذي أصبح يُعرف باسم قانون ميدو: «إنّ وفاة طفل واحد بشكل مفاجئ مأساة، ووفاة اثنين مريبة، أمّا وفاة ثلاثة فهي جريمة قتل حتى يثبت العكس»[64]. غير أنّ هذه المقولة السطحية تستند إلى سوء فهم أساسي للاحتمالات. وهو سوء الفهم نفسه الذي سيؤدّي بميدو إلى تضليل هيئة المحلّفين في قضية سالي كلارك، ألا وهو الفرق البسيط بين الأحداث المستقلّة والأحداث غير المستقلّة.

الخطأ المستقلّ

يُعتبر الحدثان غير مستقلّان إذا كانت معرفة أحدهما تؤثّر على احتمالية الآخر، وإلّا فيكونان مستقلَّين. عند وجود احتمالات لأحداث فردية، من الممارسات الشائعة مضاعفة هذه الاحتمالات معاً لإيجاد احتمال وقوع مجموعة الأحداث. على سبيل المثال، يبلغ احتمال أن يكون الشخص الذي يتمّ اختياره عشوائياً من السكّان أنثى 1/ 2. وكما هو موضّح في الجدول 3، من بين 1000 شخص في المتوسّط، فإنّ 500 منهم سيكونون من الإناث. ويبلغ احتمال أن يسجّل شخص اختير عشوائياً من بين السكّان أكثر من 110 نقاط في اختبار معدّل الذكاء 1/ 4. ويتوافق ذلك مع ما مجموعه 250 من أصل 1000 شخص بحسب الجدول 3. لمعرفة احتمال أن يكون شخص ما أنثى ويتمتّع بمعدل ذكاء يتجاوز 110، فإنّنا نضرب الاحتمالين 1/ 2 و1/ 4 معاً للحصول على احتمال 1/ 8. ويتوافق ذلك مع الـ 125 (1000/ 8) شخصاً في عمود الإناث، من ذوات معدّل الذكاء المرتفع في الجدول 3. ومن المقبول تماماً ضرب الاحتمالين معاً لإيجاد الاحتمال المشترك ليكون الشخص أنثى تتمتّع بمعدّل ذكاء مرتفع، لأنّ الذكاء والجنس مستقلّان. فامتلاك معدّل ذكاء معيّن لا يكشف شيئاً عن جنس الإنسان كما أنّ الانتماء إلى جنس معين لا يشكف شيئاً عن الذكاء.

معدّل الذكاء	**الجنس**		**المجموع**
	ذكر	**أنثى**	
>110	125	125	250
<110	375	375	750
المجموع	500	500	1000

الجدول 3: 1000 شخص موزّعون حسب الذكاء والجنس.

يبلغ معدل انتشار مرض التوحّد في المملكة المتّحدة نحو 1 بالـ 100 [65]، أو ما يعادل 10 بالـ 1000. وقد نفترض أنّه للعثور على احتمال أن يكون الشخص أنثى ويعاني من مرض التوحّد، يمكننا ببساطة ضرب الاحتمالين معاً (1/ 2 و1/ 100) للتوصّل إلى احتمال 1/ 200، أو ما يعادل 5 من كلّ 1000 شخص. غير أنّ التوحّد والجنس ليسا مستقلَّين. فعندما نقوم بتحليل 1000 شخص تمّ اختيارهم عشوائياً من بين السكّان، كما في الجدول 4، نجد أنّ انتشار مرض التوحّد بين الذكور (8 من 500) يعادل أربعة أضعاف انتشاره بين الإناث (2 من 500). بالتالي، فإنّ طيف التوحّد يشتمل على أنثى واحدة من بين كلّ خمسة مصابين[66]. ونحن بحاجة إلى هذا الجزء الإضافي من المعلومات لنعرف أنّ احتمال أن يكون الشخص الذي تمّ اختياره عشوائياً من السكّان أنثى مصابة

بالتوحّد يبلغ 2 من 1000، وليس 5 من 1000، وفقاً لحساباتنا الخاطئة المستندة إلى فرضيّة استقلال الحقيقتَين. وهذا ما يوضح مدى سهولة ارتكاب أخطاء كبيرة عندما نستخدم افتراضات غير صحيحة حول استقلال الأحداث.

متوحّد	الجنس		المجموع
	ذكر	أنثى	
نعم	8	2	10
كلّا	492	498	990
المجموع	500	500	1000

الجدول 4: 1000 شخص موزّعون حسب الجنس وما إذا كانوا يعانون من مرض التوحّد أم لا.

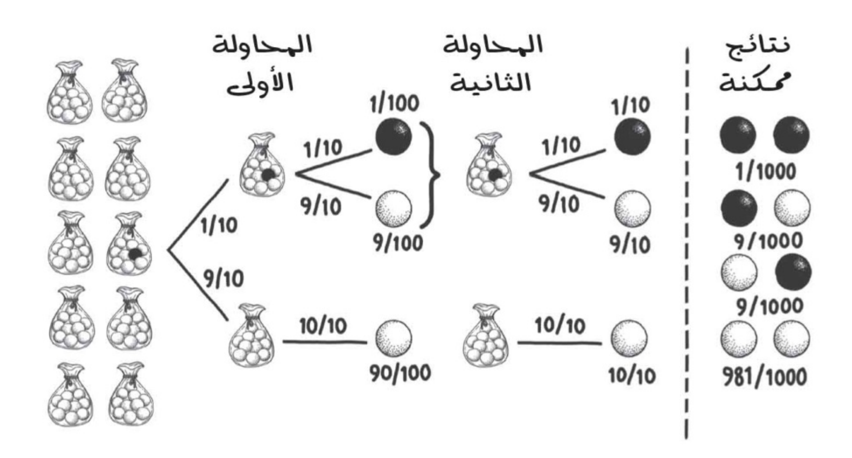
الحدثان اللذان تناولهما ميدو في شهادته هما وفاة كلّ من طفلَي سالي كلارك بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ. وللتوصّل إلى أرقامه، استخدم تقريراً لم يكن قد نُشر بعد عن تلك المتلازمة، طُلب منه كتابة مقدّمة له[67]. درس التقرير الذي أُعدّ في بريطانيا 363 حالة وفاة في المهد من أصل 473,000 ولادة حيّة على مدى ثلاث سنوات. وبالإضافة إلى تقديم معدّل الإصابة بالمتلازمة على مستوى إجمالي السكّان، قسّم التقرير البيانات بحسب عمر الأمّ، ودخل الأسرة، وما إذا كان ثمّة مدّخنين بين أفرادها. وبالنسبة إلى أسرة ثرية وخالية من المدخّنين كأسرة كلارك، وأمّ تتجاوز 26 عاماً من العمر، كان احتمال الإصابة بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ يبلغ واحد من كلّ 8543 ولادة حيّة.

كان الخطأ الأوّل الذي وقع فيه ميدو هو الافتراض أنّ حالات الإصابة بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ هي أحداث مستقلّة تماماً. وبذلك، شعر أنّ لديه المبرّرات الكافية لحساب احتمال وفاة طفلين بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ في الأسرة عن طريق ضرب الرقم 8543 بنفسه، للتوصّل إلى احتمال وقوع وفاة واحدة تقريباً في كل 73 مليون زوج من المواليد الأحياء. ولتبرير افتراضاته، ذهب إلى حدّ القول: «ما من دليل على أنّ وفاة المهد وراثية، في حين أنّه ثمّة كثير من الأدلّة على أنّ سوء معاملة الأطفال يُتوارَث». ومع هذا الرقم، اقترح أنّه مع معدّل المواليد في

المملكة المتّحدة البالغ نحو 700,000 في السنة، يمكن توقّع حدوث وفاتين في المهد مرّة تقريباً كل 100 عام.

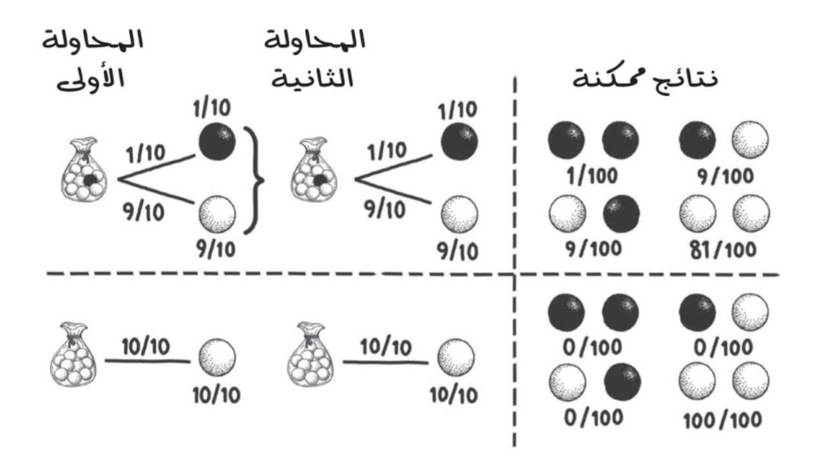
كان افتراضه خاطئاً إلى حدّ بعيد. فثمّة العديد من عوامل الخطر المعروفة المرتبطة بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ، بما في ذلك التدخين والولادة المبكرة ومشاركة السرير. في عام 2001، وجد الباحثون في جامعة مانشستر أيضاً علامات وراثية مرتبطة بتنظيم الجهاز المناعي تزيد من عرضة الأطفال لخطر موت المهد[68]. ومنذ ذلك الحين، تمّ اكتشاف العديد من عوامل الخطر الوراثية الأخرى[69]. ومن المعروف أنّ الأشقّاء يتشاركون كثيراً من المورّثات المتشابهة، ومنها ربّما خطر الإصابة بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ. هكذا، إذا مات أحد الأطفال بهذه المتلازمة، فمن المحتمل أن يكون لدى الأسرة بعض عوامل الخطر المصاحِبة. وبالتالي، فإنّ احتمال حدوث وفيات لاحقة يفوق ذاك الذي يهدّد متوسّط عدد السكّان. في الواقع، يُعتقد أنّ نحو أسرة واحدة في بريطانيا تعاني كلّ عام من وفاة ثانية بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ.

قياساً على احتمال الوفاة بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ، تخيّل 10 أكياس من الكرات الزجاجية. يحتوي كلّ من 9 من هذه الأكياس على 10 كرات بيضاء. أمّا الكيس الأخير فيحتوي على تسع كرات بيضاء وواحدة سوداء. وقد تمّ إيضاح هذه الحالة الأوّلية إلى يسار الشكل 9. في زيارتك الأولى، تختار كيساً عشوائياً، ثمّ تسحب كرة عشوائية منه. ونظراً لوجود 100 كرة، وبما أنّ احتمالات اختيار أيّ منها متساوية، فإنّ احتمال اختيار الكرة السوداء في هذه المرّة الأولى يبلغ 1 من 100. في اختيارك الثاني، تعيد الكرة الزجاجية الأولى التي أخذتها إلى كيسها وتُخرج كرة أخرى من الكيس نفسه، متجاهلاً تماماً الأكياس التسعة الأخرى. وإذا كنت قد أخرجت الكرة السوداء في المرّة الأولى، فأنت تعلم أنّك تختار من الكيس الذي يحتوي على الكرة السوداء في المرّة الثانية. وهذا يجعل احتمال اختيار الكرة السوداء أعلى بكثير، أي واحد من 10، عوضاً عن 1 من 100. وفي ظلّ هذا السيناريو، يكون اختيار كرتين سوداوين (مع احتمال 1 في الـ 1000) أعلى بكثير من مجرّد ضرب الاحتمال الأصلي المتمثّل في اختيار كرة سوداء واحدة بنفسه (للتوصّل إلى احتمال 1 في الـ 10,000). بالطريقة نفسها، بمجرّد وفاة طفل واحد بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ، يزداد احتمال وفاة الطفل الثاني بتلك المتلازمة.



الشكل 9: شجرة قرار لإيجاد احتمال اختيار الكرات السوداء أو البيضاء. لحساب احتمال اختيار كرة سوداء أو بيضاء في كلّ محاولة، اتبع الفروع المناسبة للشجرة واضرب الاحتمالات على كلّ ذراع. على سبيل المثال، يحدث انتقاء كرة سوداء في المحاولة الأولى باحتمال 1/ 100. وبمجرّد اختيار كيس في المحاولة الأولى، نختار من الكيس نفسه في المحاولة الثانية. وقد تمّ توضيح احتمالات كلّ مجموعة من مجموعات الاختيار المزدوج إلى يمين الخطّ المتقطّع.

في الواقع، مع متلازمة موت الرضّع المفاجئ، لا يتمّ اختيار عوامل الخطر التي تواجهها عائلتك عشوائياً عند ولادة طفلك الأوّل، بل بشكل محتوم - يمكن القول إنّه منذ البداية، إمّا أن تختار من الكيس المحتوي على الكرة السوداء أو لا. وقد تمّ توضيح هذا التفسير البديل في شجرة القرار في الشكل 10. إذا كنت تختار من كيس الكرة السوداء في المرّتين، فإنّ احتمال اختيار كرتين سوداوين يرتفع إلى 1 بالـ 100. وبالتأكيد، يُعدّ الاكتفاء بضرب خطر إصابة السكّان بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ بنفسه للتوصّل إلى احتمال وفاة طفلين بالمتلازمة مساراً خاطئاً.



الشكل 10: شجرتا قرار بديلتان، وفيهما يكون الكيس الذي تختار منه محتوماً، ولكنّه يبقى الكيس نفسه لكلا الاختيارين. ومع كلّ شجرة، تمّ توضيح احتمالات كلّ مجموعة من

مجموعات الاختيار المزدوج إلى يمين الخطّ المتقطّع. ويتّضح أنّنا إذا كنّا نختار من كيس بلا كرات سوداء، فالاحتمال الوحيد هو اختيار كرتين بيضاوين.

* * *

كان ثمّة مشاكل أخرى تتعلّق باستخدام ميدو للمعدل الطبقي لحالة واحدة من متلازمة موت الرضّع المفاجئ في 8543 ولادة حيّة. كما أعطى التقرير الذي اختار من خلاله هذا الرقم خطراً عامّاً بين السكّان أعلى بكثير - واحد فقط من كلّ 1303 - تمّ حسابه من دون تصنيف البيانات حسب المؤشّرات الاجتماعية الاقتصادية. وقد اختار ميدو عدم استخدام هذا الرقم البديل. عوضاً عن ذلك، ومن خلال أخذ خلفية آل كلارك بعين الاعتبار، توصّل ميدو إلى رقم جعل حالة واحدة من متلازمة موت الرضّع المفاجئ تبدو أقلّ احتمالاً بكثير (وبسبب خطئه في تجاهل عدم استقلال حالتَي الوفاة، بدت حالتان من هذه المتلازمة أقلّ احتمالاً بعد)، بينما أهمل تلك العوامل التي جعلت الأمر يبدو أكثر ترجيحاً. على سبيل المثال، اختار ميدو تجاهل حقيقة كون طفلَي سالي ذكرَين وكون المتلازمة تصيب الذكور أكثر من الإناث بمعدّل الضعف تقريباً. وكان من شأن أخذ هذا الواقع بعين الاعتبار أن يقوّض حجّة الادّعاء من خلال جعل الوفاة الثانية بالمتلازمة تبدو أكثر احتمالاً، ليتضاءل معها احتمال إقدام سالي على قتل طفلَيها.

على الرغم من أنّ تشويه الادّعاء للأدلّة الإحصائية عن طريق اختيار سمات الخلفية المؤذية فقط بشكل انتقائي كان من شأنه أن يُعتبر غير أخلاقي أو مضلِّلاً، إلاّ أنّه ثمّة مشكلة أعمق مرتبطة بهذه الممارسة. فقد تمّ تنفيذ التقسيم الطبقي للبيانات الواردة في التقرير الأصلي، والذي استمدّ منه ميدو الإحصاءات، من أجل تحديد الخصائص الديموغرافية عالية الخطورة، وذلك لنشر موارد الرعاية الصحّية واسعة النطاق بكفاءة أكبر. ولم يكن القصد من ذلك استخدامها لاستنتاج خطر إصابة فرد معيّن في هذه المجموعات بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ. كان التقرير عبارة عن تحقيق واسع النطاق في نحو نصف مليون ولادة في المملكة المتّحدة، ممّا يعني أنّه لا يمكن التحقيق في الظروف الفردية لكلّ ولادة بالتفصيل. في المقابل، شكّل استجواب سالي كلارك تحقيقاً مفصّلاً للغاية في زعم معيّن. وقد اكتفى الادّعاء باختيار تلك الجوانب من خلفية سالي وستيف التي ناسبت التقرير، وافترض أنّ باستطاعته استخدام ذلك لتحديد خطر إصابة أولاد أسرة كلارك بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ. لكنّ هذا المنحى يُخطئ في الافتراض أنّ خصائص الفرد مشابهة لخصائص السكّان. وهذا مثال كلاسيكي لما يُعرف باسم المغالطة البيئية.

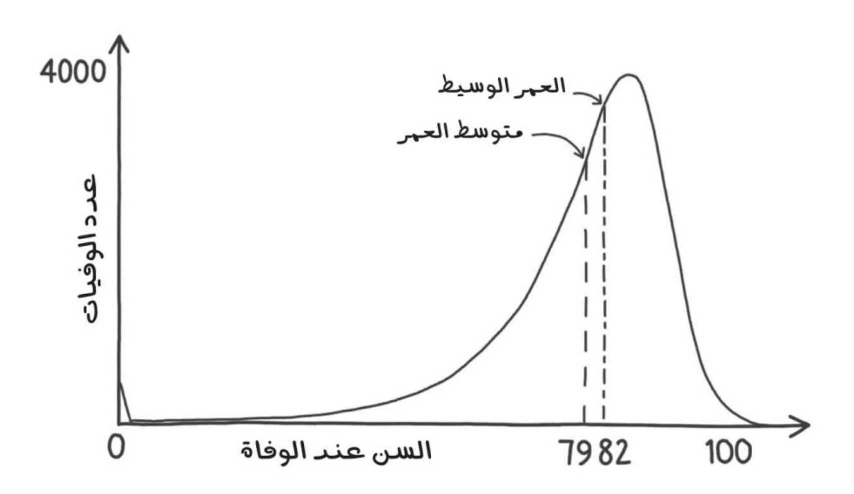
المغالطة البيئية

يحدث نوع من المغالطات البيئية عندما نفترض بسذاجة أنّ من شأن إحصائية واحدة أن تميّز مجموعة متنوّعة من السكّان. على سبيل المثال، في المملكة المتّحدة في عام 2010، كان متوسّط العمر المتوقّع للمرأة 83 عاماً. أمّا بالنسبة إلى الرجال، فلم يكن هذا الرقم يتجاوز 79 عاماً فقط. وكان متوسّط العمر المتوقّع للسكّان 81 عاماً. ومن الأمثلة البسيطة على المغالطات البيئية القول إنّ متوسّط العمر المتوقّع للإناث يفوق متوسّط عمر الذكور، أي أنّ أيّ أنثى يتمّ اختيارها عشوائياً ستعيش أطول من أيّ ذكر يتمّ اختياره عشوائياً. لهذه المغالطة اسم خاصّ (وملائم)، وهو «التعميم الشامل». ثمّة مغالطة بيئية أخرى شائعة وبسيطة تستند إلى *زيادة* متوسّط العمر المتوقّع وتتمثّل في عبارة «نحن جميعاً نعيش أكثر من ذي قبل»، والتي كثيراً ما نسمعها على ألسنة الصحفيين الكسالى. والحال أنّه لن يعيش الجميع لفترة أطول ممّا توقّعوا في السابق. من الواضح إذاً أن هذه الاقتراحات ساذجة في أحسن الأحوال.

مع ذلك، من شأن المغالطات البيئية أن تكون أكثر دقّة. فقد يفاجئك أن تعرف أنّه على الرغم من متوسّط العمر المتوقّع البالغ 78.8 عاماً فقط، فإنّ غالبية الذكور البريطانيين يعيشون أطول من متوسّط العمر المتوقّع للسكّان والبالغ 81 عاماً. للوهلة الأولى، تبدو هذه العبارة متناقضة، غير أنّها ترجع في الواقع إلى تباين في الإحصائيات التي نستخدمها لتلخيص البيانات. ذلك أنّ العدد الصغير، ولكن المهمّ، من الأشخاص الذين يموتون في سنّ مبكرة يؤثّر على متوسّط العمر المتوقّع للوفاة (أي متوسّط العمر المتوقّع الذي يتمّ فيه جمع أعمار الوفاة لدى كلّ الناس ومن ثمّ تقسيمه على إجمالي عددهم). ومن المثير للدهشة أنّ هذه الوفيات المبكرة تخفض متوسّط العمر إلى ما دون المعدّل الوسيط (أي العمر الذي يقع في الوسط تماماً، ويكون عدد الناس الذين يموتون قبله مساوياً لعدد أولئك الذين يموتون بعده). يبلغ العمر الوسيط لوفاة الذكور في المملكة المتّحدة 82 عاماً، ممّا يعني أنّ نصفهم على الأقلّ سيكون قد بلغ هذا العمر عند الوفاة. في هذه الحالة، فإنّ الإحصائيات الموجزة المقدَّمة - أي أنّ متوسّط سنّ الوفاة يبلغ 78.8 سنة - هي وصف مضلّل بشكل خاصّ للسكّان.

منحنى الجرس، أو التوزيع الطبيعي، والذي يمكن استخدامه لتمييز العديد من مجموعات البيانات اليومية، من المرتفعات إلى درجات معدّل الذكاء، هو منحنى متماثل بشكل جميل تقع فيه نصف البيانات على أحد جانبي المعدّل المتوسّط ونصفها على الجانب الآخر. هذا يعني أنّ المتوسّط والوسيط - قيمة البيانات في الوسط - يميلان إلى التطابق بالنسبة إلى الخصائص التي تتبع هذا التوزيع. بما أنّنا معتادون على كون هذا المنحنى البارز قادراً على وصف معلومات الحياة الواقعية،

يفترض كثير منّا أنّ المتوسّط يشكّل مؤشّراً جيداً لـ «وسط» مجموعة بيانات معيّنة. ونفاجأ عندما نصادف توزيعات يكون فيها المعدّل المتوسّط منحرفاً عن الوسيط. ومن الواضح أنّ توزيع أعمار الوفاة للذكور البريطانيين، المعروض في الشكل 11، بعيد عن التماثل. وعادة، نَصِف هذه التوزيعات أنّها «منحرفة».



الشكل 11: يتبع العدد السنوي للوفيات الذكور المرتبط بالسنّ في بريطانيا العظمى توزيعاً منحرفاً. هكذا فإنّ متوسّط عمر الوفاة هو أقلّ بقليل من 79 عاماً، بينما يبلغ العمر الوسيط للوفاة 82 عاماً.

كما رأينا في الفصل السابق (عندما ذكرنا المعدّل الوسيط لأوّل مرّة في معرض الحديث عن تجنّب الإنذارات الكاذبة)، يشكّل توزيع دخل الأسرة إحصائيةً أخرى يرسم فيها الوسيط صورة مختلفة تماماً عن المتوسّط. على سبيل المثال، يشتمل توزيع دخل الأسرة في المملكة المتّحدة الموضّح في الشكل 4 هو الآخر على توزيع منحرف للغاية، يشبه إلى حدّ كبير نسخة مقلوبة وأكثر فوضوية بعض الشيء من الشكل 11. إذ تتقاضى معظم الأسر في المملكة دخلاً متاحاً متدنّياً. غير أنّه ثمّة عدد صغير، ولكنّه هامّ، من أصحاب الدخل المرتفع الذين يؤثّرون على التوزيع. بالتالي، في عام 2014، كان ثلثا السكّان في المملكة المتّحدة يتقاضون دخلاً أسبوعياً دون «المعدّل».

ثمّة مثال أكثر إثارة للدهشة، ألا وهو الأحجية القديمة: «ما هو احتمال أن يكون للشخص التالي الذي تقابله وأنت تسير في الشارع عدداً من الأرجل يفوق المعدّل؟» الجواب «مؤكّد تقريباً». ذلك أنّ قلّة قليلة من الناس الذين خسروا إحدى أو كلتا ساقيهم هم المسؤولون عن انخفاض بسيط في المعدّل المتوسّط بحيث يكون لدى كلّ من يملك ساقَين عدداً من الأرجل يفوق المعدّل. وفي هذه الحالة، سيكون من السخف الافتراض أنّ المعدّل المتوسّط يصف بشكل صحيح أيّ فرد من السكان.

من الواضح أنّ استخدام النوع الخاطئ من المعدّل لوصف السكان من شأنه أن يسبّب مغالطة بيئية. نصادف نوعاً آخر من المغالطات البيئية، يعرف باسم مفارقة سيمبسون، عندما نحاول أخذ معدّل المعدّلات. في الواقع، لمفارقة سيمبسون تداعيات في مجالات متنوّعة، من قياس صحّة الاقتصاد[70]، إلى فهم ملامح الناخبين[71]، وربّما الأهمّ من ذلك هو مجال تطوير الأدوية[72]. تخيّل، مثلاً أن نكون مسؤولين عن تجربة موجَّهة لعقار جديد، فانتاستيكول Fantasticol، مصمّم لمساعدة الناس على خفض ضغط الدم لديهم. انضمّ إلى التجربة 2000 شخص، يتساوى فيهم عدد الرجال والنساء. لأغراض المراقبة، قمنا بتقسيمهم إلى مجموعتين من 1000 شخص. سيعطى مرضى المجموعة A عقار فانتاستيكول، بينما سيحصل مرضى المجموعة B على دواء وهمي. في نهاية التجربة، تبيّن أنّ ضغط الدم قد انخفض لدى 56% (560 من أصل 1000) من الذين تناولوا الدواء، في حين أنّ 35% فقط (350 من أصل 1000) من مجموعة العلاج الوهمي وجدوا تحسّناً (انظر الجدول 5). بالتالي، يبدو أنّ فانتاستيكول يحدث فرقاً بالفعل.

علاج	أ: فانتاستيكول	ب: علاج وهمي
تحسّن	560	350
عدم تحّسن	440	650
نسبة التحسّن	56%	35%

الجدول 5: يبدو أنّ فانتاستيكول يعطي معدّل تحسّن عامّ أفضل من العلاج الوهمي.

من أجل استهداف الدواء بشكل صحيح، من المهمّ معرفة ما إذا كانت له آثار مرتبطة بالجنس. من أجل ذلك، نقوم بتفكيك الأرقام لمعرفة كيف يؤثّر الدواء على الذكور والإناث بشكل منفصل. يرد هذا التحليل التفصيلي في الجدول 6. وعندما نحلّل النتائج الطبقية، نفاجأ قليلاً. فمن بين الرجال المشاركين في التجربة، تحسّن ضغط الدم لدى 25% (200 من أصل 800 في المجموعة ب) من الذين تناولوا الدواء الوهمي، في حين لم تتحسّن سوى نسبة 20% فقط (40 من أصل 200 في المجموعة أ) من الذين تناولوا فانتاستيكول. وبدا التوجّه نفسه لدى النساء. إذ تحسّنت نسبة 75% (150 من أصل 200) من النساء اللواتي تناولن العلاج الوهمي، مقارنة بـ 65% فقط (520 من 800) من النساء اللواتي تناولن فانتاستيكول. وبالنسبة إلى كلا الجنسين، كانت نسبة التحسّن لدى المرضى الذين أخذوا الدواء الوهمي أعلى منها لدى أولئك الذين أخذوا الدواء الحقيقي. بالنظر إلى

البيانات من هذه الزاوية، يبدو أنّ فانتاستيكول أقلّ فعالية من الدواء الوهمي. فكيف يمكن أن تختلف نتائج التحليل الطبقي إلى هذا الحدّ عن نتائج التجربة ككلّ؟ وأيّها هي الصحيحة؟

الجنس	**ذكر**		**أنثى**	
العلاج	**فانتاستيكول**	**دواء وهمي**	**فانتاستيكول**	**دواء وهمي**
تحسّن	40	200	520	150
عدم تحسّن	160	600	280	50
المجموع	200	800	800	200
معدّل التحسّن	20%	25%	65%	75%

الجدول 6: عند تصنيف المشاركين بحسب الجنس، نجد أنّ المرضى من كلا الجنسين الذين تناولوا الدواء الوهمي أحرزوا تحسّناً أكبر من المرضى الذين تناولوا فانتاستيكول.

تكمن الإجابة في ما يسمّى المتغيّر «الملتبس» أو «الكامن». وفي هذه الحالة، المتغيّر هو الجنس. فقد اتّضح أنّ جنس المرء مهمّ للغاية بالنسبة إلى النتائج. في الواقع، خلال فترة التجربة، تحسّن ضغط الدم بشكل طبيعي لدى النساء أكثر من الرجال. وبما أنّ التصنيف الجنسي كان مختلفاً في المجموعتين (800 أنثى و200 ذكر في مجموعة الدواء أ و200 أنثى و800 ذكر في مجموعة العلاج الوهمي ب)، فقد استفادت المجموعة أ بشكل كبير من وجود عدد كبير من النساء اللواتي تحسّنّ بشكل طبيعي، ممّا جعل فانتاستيكول يبدو أنّه أكثر فاعلية من الدواء الوهمي. وعلى الرغم من مشاركة عدد متساوٍ من الرجال والنساء في التجربة، إلّا أنّه بسبب عدم توزيعهم بالتساوي على المجموعتين، فإنّ أخذ معدّل نسبتَي النجاح المنفصلتين للعقار لدى الجنسين (20% للرجال و65% للنساء) لا يعطينا نسبة النجاح الإجمالية لعقار فانتاستيكول، أي 56%، التي ظهرت في الجدول 5. بالتالي، لا يمكننا الاكتفاء بأخذ معدّل المعدّل.

من المقبول أخذ معدّل المعدّل فقط إذا كنّا على ثقة تامّة من أنّنا نسيطر على المتغيّرات الملتبسة. فلو علمنا مقدّماً أنّ الجنس هو أحد هذه المتغيّرات، لأدركنا أنّه من الضروري تقسيم النتائج بحسب الجنس للحصول على صورة حقيقية لفاعلية فانتاستيكول. وإلّا، لكان بإمكاننا السيطرة على عامل الجنس عن طريق توزيع أعداد متساوية من الرجال والنساء في كلّ مجموعة، كما في الجدول

7. إذ تبقى معدّلات التحسّن لدى الرجال والنساء الذين يتناولون فانتاستيكول أو الدواء الوهمي كما هي في الجدول 6. ولكن، عندما يتمّ دمج النتائج في الجدول 8، وننظر إلى معدّلات التحسن لفانتاستيكول (معدّل تحسّن بنسبة 42.5%) يتّضح لنا أنّ مفعول الدواء أسوأ، وليس أفضل، من العلاج الوهمي (معدّل التحسّن 50%). بالطبع، قد يكون ثمّة متغيّرات ملتبسة أخرى، مثل العمر أو المتغيّرات الديموغرافية الاجتماعية التي لم نأخذها بعين الاعتبار.

الجنس	ذكر		أنثى	
العلاج	**فانتاستيكول**	**دواء وهمي**	**فانتاستيكول**	**دواء وهمي**
تحسّن	100	125	325	375
عدم تحسّن	400	375	175	125
المجموع	500	500	500	500
معدّل التحسّن	20%	25%	65%	75%

الجدول 7: تبقى نسبة الرجال والنساء الذين وجدوا تحسّناً على كلّ علاج كما هي في الجدول 6 عند توزيع الذكور والإناث بالتساوي بين المجموعتين.

علاج	أ: فانتاستيكول	ب: علاج وهمي
تحسّن	425	500
عدم تحّسن	575	500
نسبة التحسّن	42.5%	50%

الجدول 8: عندما أخذنا بعين الاعتبار المتغيّر الجنسي الملتبس، اتّضح أنّ مفعول فانتاستيكول لم يكن بجودة مفعول الدواء الوهمي.

تمثّل المغالطات البيئية والضوابط المنظّمة اعتبارات جدّية بالنسبة إلى مصمّمي التجارب السريرية (كما رأينا في الفصل 2 وكما سنرى لاحقاً في الفصل 4، ولكن لأسباب مختلفة)، لكن من المعروف أنّها تسبّب إرباكاً في مجالات أخرى في الطبّ أيضاً. ففي ستّينيات وسبعينيات القرن

المنصرم، لوحظت ظاهرة غريبة لدى أطفال الأمّهات اللواتي واصلن التدخين أثناء الحمل. فالأطفال المولودون لأمّهات مدخّنات كانوا منخفضي الوزن عند الولادة، غير أنّهم أقلّ عرضة للوفاة في السنة الأولى من حياتهم مقارنة بالأولاد المولودين لأمّهات غير مدخّنات. لطالما ارتبط انخفاض الوزن عند الولادة بارتفاع معدّل الوفيات بين الرضّع، ولكن يبدو أنّ التدخين أثناء الحمل وفّر بعض الحماية للأطفال الذين ولدوا بوزن منخفض[73]. غير أنّ حقيقة الأمر كانت بعيدة كلّ البعد عن هذا التفسير[74]. أمّا حلّ المفارقة فيكمن في متغيّر ملتبس.

على الرغم من أنّ انخفاض معدّل المواليد *يرتبط* بارتفاع معدّل وفيات الرضّع، إلّا أنّه لا يتسبّب في ارتفاع معدّل وفيات الرضّع. عادة، يمكن أن ينتج كلاهما عن حالات معاكسة أخرى، أي متغيّر ملتبس. فمن شأن التدخين وغيره من الظروف الصحّية المعاكسة أن تخفض الوزن عند الولادة وترفع معدّل وفيات الرضّع، ولكن بدرجات متفاوتة. إذ يعتبر التدخين مسؤولاً عن نقص الوزن عند الولادة لدى كثير من الأطفال الذين كانوا ليولدوا سليمين. وعادة ما تكون الأسباب الأخرى لانخفاض الوزن عند الولادة أكثر خطراً على صحّة الطفل، ممّا يؤدّي إلى ارتفاع معدّل وفيات الرضّع في هذه الحالات. والنسبة الأكبر بكثير من الأطفال الذين يعانون من انخفاض الوزن عند الولادة والذين يولدون لأمّهات مدخّنات، بالإضافة إلى معدّل وفيات الرضّع الذي لم يشهد سوى ارتفاعاً طفيفاً، تعني أنّ نسبة أقلّ من هؤلاء الأطفال يموتون في عامهم الأوّل مقارنة بالأطفال الذين يولدون بوزن منخفض بسبب حالة أكثر تهديداً للحياة.

هكذا فإنّ المغالطة البيئية التي ارتكبها ميدو، عن طريق تصنيف الزوجين كلارك في الفئة الاقلّ عرضة لمتلازمة موت الرضّع المفاجئ، جعلت وفاة طفلين تبدو مثيرة للشكوك أكثر بكثير مما لو تمّ استخدام المعدّل السكّاني الأعلى للمتلازمة. وحتّى عند استخدام المعدّل السكّاني للإصابة بالمتلازمة، ستترتّب على ذلك مغالطة بيئية. لكن مع ذلك، يمكن القول إنّ الافتراض على مستوى السكّان هو أقلّ تحيّزاً، وبالتالي أكثر ملاءمة للحالات التي تكون فيها حرّية المرأة على المحكّ. والافتراض الخاطئ أنّ الوفاتان لا علاقة لهما بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ جعل الأمور أسوأ.

مغالطة المدّعي العام

استمرّ ميدو بالتخبّط في إحصائيّاته، وسُمح له بارتكاب خطأ إحصائي أكثر خطورة. وهذا الخطأ شائع جدّاً في قاعات المحاكم، ويعرف باسم «مغالطة المدّعي العام». تبدأ الحجّة بالإظهار أنّه

إذا كان المشتبه به بريئاً، فمن المستبعد للغاية رؤية دليل معيّن ضدّه. وبالنسبة إلى سالي كلارك، كان هذا تأكيداً على أنّها، إذا كانت بريئة من قتل طفليها، فإنّ احتمال وفاة طفلين رضيعين كان منخفضاً ولا يتجاوز واحداً من 73 مليوناً. ثم يستنتج المدّعي العام، بشكل خاطئ، أنّ التفسير البديل - أي كون المشتبه بها مذنبة - هو أمر محتمل للغاية. غير أنّ الحجّة تتجاهل الأخذ بعين الاعتبار أيّ تفسيرات بديلة محتملة يكون فيها المشتبه به بريئاً: كموت طفلَي سالي لأسباب طبيعية، على سبيل المثال. كما أنّها تتجاهل احتمال كون التفسير الذي يقترحه الادّعاء، وفيه تكون المشتبه بها مذنبة (قتل مزدوج لرضيعَين في حالة سالي)، غير مرجّح بنفس القدر، إن لم يكن أكثر.

لشرح المشاكل المتعلّقة بمغالطة المدّعي العام، سنتخيّل أنّنا نحقّق في جريمة. الدليل الوحيد الذي لدينا هو رقم التسجيل الجزئي للسيارة، التي لا بدّ أن تكون سيّارة الجاني، بعد أن شوهد وهو يقودها بعيداً عن مكان الحادث. لنفرض، لأغراض هذا المثال، أنّ جميع لوحات الأرقام تتكوّن من سبعة أرقام، تتراوح من 0 إلى 9. ثمّة 10 احتمالات لكلّ من الأرقام السبعة، أي أنّه ثمّة 10 × 10 × 10 × 10 × 10 × 10 × 10 أو 10,000,000 (عشرة ملايين) من هذه اللوحات على الطريق. تذكّر شاهد العيان الذي أبلغ عن لوحة السيارة الأرقام الخمسة الأولى، لكنّه لم يستطع قراءة آخر رقمين. بمجرّد تحديد هذه الأرقام الخمسة الأولى، فإنّنا سنختار من بين مجموعة أصغر بكثير من السيارات ذات رقمين فقط غير معروفين. وثمّة 10 اختيارات لكلّ من هذين الرقمين غير المعروفين، أي أنّه لا يوجد سوى 100 (10 × 10) لوحة محتملة بها الأرقام الخمسة الأولى المذكورة.

تمّ العثور على مشتبه به تتطابق لوحة سيارته مع الأرقام الخمسة التي تذكّرها الشاهد. إذا كان المشتبه به بريئاً، فثمّة 99 سيّارة أخرى فقط، من أصل 10 ملايين سيّارة على الطريق، تتطابق مع الأرقام الخمسة الأولى. بالتالي، فإنّ احتمال أن يكون الشاهد قد لاحظ مثل هذه اللوحة الرقمية إذا كان المشتبه به بريئاً هو 99/ 10,000,000، أي دون واحد من مائة ألف (1/ 100,000). يبدو أنّ هذا الاحتمال الضئيل في رؤية الدليل إذا كان المشتبه به بريئاً يشير بشكل ساحق إلى أنّ المشتبه به مذنب. مع ذلك، فإنّ افتراض ذلك يعني ارتكاب مغالطة المدّعي العامّ.

إنّ احتمال رؤية الدليل إذا كان المشتبه به بريئاً يختلف عن احتمال كون المشتبه به بريئاً، لو تمّ أخذ ذاك الدليل بالاعتبار. تذكّر أنّ 99 من أصل 100 سيّارة تطابق وصف الشاهد لا تنتمي إلى المشتبه به. فالمشتبه به هو مجرّد واحد من 100 شخص يقودون مثل تلك السيّارة. وبالتالي، فإنّ احتمال كون المشتبه به مذنباً استناداً إلى لوحة الأرقام سيارته، لا يتجاوز 1/ 100 - وهو أمر غير

مرجّح إلى حدّ بعيد. بطبيعة الحال، فإنّ الأدلّة المخفّفة الأخرى التي تربط المشتبه به بمنطقة الجريمة أو تستبعد السيّارات الأخرى التي كانت موجودة في المنطقة من شأنها أن تزيد من احتمال كون المشتبه به مذنباً. مع ذلك، وبناءً على دليل واحد، ينبغي أن يكون الاستنتاج المحتمل على الأغلب هو أنّ المشتبه به بريء.

لا تعتبر مغالطة المدّعي العام فاعلة حقّاً إلّا عندما تكون فرصة براءة المشتبه به ضئيلة للغاية، وإلّا فيكون من السهل للغاية رؤية خطأ الحجّة. على سبيل المثال، تخيّل تحقيقاً في عمليّة سطو في لندن. يتبيّن أنّ دماء مرتكب الجريمة، التي تمّ العثور عليها في مسرح الجريمة، هي من فئة دم مشتبه به، لكن من دون أيّ دليل آخر. 10% فقط من السكّان يحملون فئة الدم هذه. بالتالي، فإنّ احتمال العثور على دم من هذه الفئة في مكان الحادث إذا كان المتّهم بريئاً (أي أنّ شخصاً آخر من السكّان ارتكب الجريمة) هو 10%. تتمثّل مغالطة المدّعي العام في الاستنتاج أنّ احتمال كون المشتبه به بريئاً في ضوء دليل فئة الدم يبلغ أيضاً 10% فقط - واحتمال كونه مذنباً 90%. بالطبع، في مدينة مثل لندن، يبلغ تعداد سكّانها 10 ملايين نسمة، سيكون ثمّة مليون شخص آخر تقريباً (10% من إجمالي السكاّن) يملكون فصيلة دم مطابقة لتلك الموجودة في مسرح الجريمة. وهذا ما يجعل احتمال كون المشتبه به مذنباً، بناءً على دليل الدم وحده، واحداً بالمليون. على الرغم من أنّ العثور على فصيلة الدم نفسها هو أمر نادر نسبيّاً (واحد من عشرة)، لأنّ كثيراً من الأشخاص يتشاركون فصيلة الدم تلك، إلّا أنّ ذلك الدليل وحده لا يكفي إطلاقاً لإدانة أو تبرئة مشتبه به من الفصيلة نفسها.

* * *

في المثال أعلاه كانت المغالطة واضحة نسبيّاً. إذ يبدو من السخافة الافتراض أنّ احتمال البراءة قد يكون منخفضاً ولا يتعدّى واحداً من 10، استناداً إلى فصيلة دم فرد ضمن عدد كبير من السكّان. مع ذلك، في قضيّة سالي كلارك، كانت الأرقام ضئيلة بما يكفي لجعل المغالطة غامضة للغاية بالنسبة إلى هيئة محلّفين غير مدرّبين في مجال الإحصائيات. ومن المشكوك فيه أنّ ميدو نفسه كان يعلم أنّه ارتكب مغالطة عندما قال: «... إنّ فرصة وفاة الطفلين بشكل طبيعي في ظلّ هذه الظروف هو احتمال بعيد جدّاً جدّاً: لا يتعدّى واحداً من 73 مليوناً».

فيكون الاستدلال الذي قد تستخلصه هيئة محلّفين غير مدرّبة على النحو التالي: «إنّ وفاة طفلين لأسباب طبيعية أمر نادر للغاية؛ لذلك، بالنسبة إلى عائلة خسرت طفلَين، يُعدّ احتمال كون هاتان الوفاتان غير طبيعيتين مرتفعاً للغاية».

عزّز ميدو هذا المفهوم الخاطئ من خلال وضع الرقم واحد من 73 مليوناً في سياق أغنى، ولكنّه زائف. إذ ادّعى أنّ فرصة وفاة طفلين بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ في عائلة واحدة تعادل المراهنة على 80 إلى غريب واحد في سباق الخيل Grand National أن يجري ويفوز أربع سنوات على التوالي. وهذا ما جعل فرصة إيجاد تفسير بريء لموت الطفلين يبدو غير مرجّح على الإطلاق، ودفع هيئة المحلّفين إلى الافتراض أنّ التفسير البديل، أي أن تكون سالي قد قتلت طفليها، مرجّح للغاية.

من المستبعد للغاية وفاة طفلين بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ. غير أنّ هذا الأمر في حدّ ذاته لا يوفّر لنا معلومات مفيدة حول مدى احتمال إقدام سالي على قتل طفليها. وفي الواقع، يعتبر التفسير البديل الذي اقترحه الادّعاء أقلّ احتمالاً. فقد أظهرت الحسابات أنّ القتل المزدوج للرضّع هو أقلّ تواتراً بما يتراوح بين 10 و100 مرّة من وفاة طفلين بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ[75]. هذا على افتراض أنّ الرقم الأخير يشير إلى إمكانية كون الأمّ مذنبة بنسبة واحد بالمائة فقط، قبل أن يتمّ النظر في أيّ دليل مخفّف آخر. مع ذلك، فإنّ احتمال القتل المزدوج لم يقدّم إلى هيئة المحلّفين للمقارنة. ذلك أنّ دفاع سالي لم يشكّك مطلقاً في إحصائيّات ميدو بشكل حاسم، ممّا جعلها تُطرح بلا منازع.

* * *

بعد مداولات استمرّت يومين، في 9 نوفمبر 1999، وجدت هيئة المحلّفين سالي مذنبة، وأدانتها بأغلبية 10-2. وذُكر أنّ أحد المحلّفين أسرّ لصديق له أنّ إحصائيّة ميدو كانت الدليل الذي أثّر على غالبيّة هيئة المحلّفين في أحكامهم. حكم على سالي بالسجن مدى الحياة. وأثناء قراءة العقوبة، نظرت سالي إلى زوجها، ستيف، الذي قال لها بصوت خافت، «أنا أحبّك». كان أكبر داعم لها ولن يتوقّف عن القتال من أجلها طوال الفترة التي قضتها في السجن، والتي أسمتها «الجحيم الحيّ». وبينما كان يتمّ اقتيادها، نظرت إلى الوراء عبر الرواق وأجابته بصمت: «أحبّك».

لم يُضع الإعلام الوقت ليغرز خنجره. كان عنوان صحيفة ديلي ميل «محامية تقتل طفليها تحت تأثير المشروب واليأس»، بينما أشارت صحيفة ديلي تلغراف إلى أنّ «قاتلة الطفلين» كانت «ثملة ووحيدة». باتت سمعة سالي خارج السجن في الحضيض. أمّا في الداخل، فكانت حياتها أشبه بالجحيم بصفتها ابنة شرطي ومدانة بقتل طفلين.

قضت سالي عاماً في السجن، بعيدة عن زوجها وابنها الصغير. وكان مصدر الراحة الوحيد هو الرسائل التي كانت تصلها من الغرباء الذين اقتنعوا أنّها بريئة. في الخارج، تمسّك ستيف بقناعته ببراءة سالي. وبعد نحو 12 شهراً من العمل الشاقّ، باتا جاهزَين أخيراً لمواجهة القضاة مجدّداً في محكمة الاستئناف. كان الاستئناف مرتكزاً بشكل أساسي على عدم دقّة الإحصائيات. أوضح الخبراء الإحصائيون للقضاة المغالطات البيئية المتمثّلة في تصنيف الزوجين كلارك ضمن الفئة الأقلّ عرضة لخطر متلازمة موت الرضّع المفاجئ، وافتراض الاستقلال الخاطئ الذي قدّمه ميدو عن طريق تربيع احتمال وفاة واحدة بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ، ومغالطة المدّعي العام التي وقعت فيها هيئة المحلّفين.

بدا أنّ رؤساء المحكمة فهموا كلّ هذه الحجج وأخذوها بعين الاعتبار. وفي الملخّص الذي عرضوه، قبلوا أنّ إحصائيّات ميدو لم تكن دقيقة، لكنّهم احتجّوا أنّه من المفترض أن تكون مجرّد أرقام تقريبية. واعتقد القضاة أنّ مغالطة المدّعي العام كانت واضحة لدرجة أنّه كان ينبغي الاعتراض عليها من قبل المحامي المدافع عن سالي. وقد اعتبر القضاة عدم تقديم أيّ اعتراضات دليلاً على أنّ المغالطة كانت واضحة للجميع:

> من البديهي القول إنّ عبارة «في الأسر التي يولد فيها طفلان، تبلغ فرصة وفاة كليهما فعلاً بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ 1 من 73 مليوناً» لا تعادل القول «إذا شهدت أسرة ما وفاة طفلين رضيعين، فإنّ احتمال أن تكون كلتا حالتا الوفاة غير مبرّرتين أو محاطتَين بظروف مشبوهة يبلغ 1 من 73 مليوناً». والمرء لا يحتاج إلى استعمال تسمية «مغالطة المدّعي العامّ» لكي يكون ذلك واضحاً.

خلص القضاة إلى أنّ دور الأدلّة الإحصائية في المحاكمة كان ضئيلاً لدرجة أنّه لم يكن ثمّة احتمال لتضليل هيئة المحلّفين. وعوضاً عن كون الإحصائيّات الصخرة التي عُرضت على هيئة المحلّفين للتمسّك بها في عاصفة من الأدلّة الطبّية المتناقضة، لم تكن على ما يبدو أكثر من قطرة في المحيط، وأقرب إلى «عرض جانبي» رفضه القضاة. هكذا تمّ تأييد إدانة سالي الأصلية وأعيدت في الليلة نفسها إلى السجن.

* * *

محاكمة سالي كلارك ليست بأيّ حال من الأحوال المحاكمة الوحيدة التي أسيء فيها استعمال وفهم الاحتمالات. ففي عام 1990، تعرّض أندرو دين للتشهير بسبب مغالطة المدّعي العامّ

نفسها خلال محاكمته بتهمة اغتصاب ثلاث نساء في مسقط رأسه مانشستر، في شمال غرب إنكلترا. تمّت إدانته وحُكم عليه بالسجن لمدّة 16 عاماً. في المحاكمة، قدّم محامي الادعاء، هوارد بنتهام، أدلّة الحمض النووي من السائل المنوي الموجود على إحدى الضحايا. إذ ادّعى بنتهام أنّ الحمض النووي لعيّنة من دم المتّهم يطابق الحمض النووي لعيّنة السائل المنوي. وعندما سأل الشاهدَ الخبير، «إذن فإنّ احتمال أن يكون المذنب أيّ رجل آخر غير أندرو دين يبلغ واحد من ثلاثة ملايين؟" أجاب الخبير، «نعم». ومضى مضيفاً، «بحسب استنتاجي، السائل المنوي يعود إلى أندرو دين». حتّى إنّ القاضي ادّعى في ملخّص المحاكمة أنّ الرقم واحد من ثلاثة ملايين «يجاور حدّ اليقين».

في الواقع، يجب تفسير نسبة واحد من ثلاثة ملايين على أنّها احتمال أن يكون للفرد الذي اختير عشوائياً من بين السكّان عموماً بصمة وراثية تطابق أوصاف السائل المنوي الموجود في مسرح الجريمة. وبالنظر إلى وجود نحو 30 مليون ذكر يعيشون في المملكة المتّحدة في ذلك الوقت، يمكننا أن نتوقّع تطابق 10 منهم مع البصمة الوراثية، ممّا يرفع بشكل كبير احتمال براءة المتّهم من نسبة واحد من ثلاثة ملايين غير المرجّحة، إلى 9 من 10 الأكثر ترجيحاً بكثير. بالطبع، ليس جميع ذكور المملكة المتّحدة البالغ عددهم 30 مليوناً مشتبهاً بهم محتملين. مع ذلك، حتّى لو حصرنا بحثنا ضمن سبعة ملايين شخص يعيشون على بعد ساعة بالسيّارة من وسط مدينة مانشستر، فإنّنا ما زلنا نتوقّع أن يتطابق ذكر واحد على الأقلّ مع الأوصاف الوراثية، الأمر الذي يجعل احتمال براءة دين متساوياً: واحد إلى واحد. غير أنّ مغالطة المدّعي العامّ دفعت هيئة المحلّفين إلى الاعتقاد أنّ احتمال كون دين مذنباً يفوق بمئات المرّات ما يشير إليه الدليل بالفعل.

في الواقع، حتّى دليل الحمض النووي الذي ربط دين بالجرائم لم يكن مقنعاً بقدر ما ادّعى الشاهد الخبير. وقد تبيّن خلال الاستئناف أنّ حمض دين النووي وذاك الموجود في مسرح الجريمة لم يكونا متشابهين بقدر ما اعتُقد في البداية. فبدلاً من واحد من ثلاثة ملايين، كان احتمال حدوث تطابق عشوائي مع شخص آخر غير دين يبلغ في الواقع نحو 1 من 2500، ممّا يجعل براءة دين أكثر احتمالاً بكثير. وإذا أضفنا ذلك إلى حقيقة وجود أكثر من ثلاثة ملايين ذكر في محيط مسرح الجريمة، ما يعني أكثر من 1000 شخص مطابِق محتمل، فإنّ احتمال كون دين مذنب استناداً إلى الحمض النووي ينخفض إلى أقلّ من واحد في الألف. هكذا أدّى التفسير المنقّح لأدلّة الطبّ الشرعي، والاعتراف بأنّ كلّاً من القاضي الأصلي والشاهد الخبير قد ارتكبا مغالطة المدّعي العامّ، إلى إلغاء حكم إدانة دين.

نوكس والسكين

من القضايا الأخرى التي تضافر فيها فهم أدلّة الحمض النووي واحتمال تأدية دور محوري قضيّةُ الطالبة البريطانية التي تعرّضت للقتل، ميريديث كيرشر. ففي عام 2007، طُعنت كيرشر حتّى الموت في الشقّة التي تعيش فيها مع زميلتها في السكن ضمن برنامج لتبادل الطلّاب، أماندا نوكس، في بيروجيا، إيطاليا. بعد ذلك بعامين، أي في عام 2009، صدر حكم بالإجماع بإدانة نوكس وصديقها الإيطالي السابق رافاييل سوليسيتو بقتل كيرشر. وكان أحد الأدلّة الحاسمة التي قدّمها الادّعاء سكّين بحجم وشكل يتوافقان مع بعض الجروح التي لحقت بجثة كيرشر. تمّ العثور على السكين في مطبخ سوليسيتو، وكان على مقبضها حمض نوكس النووي، الأمر الذي ربط كلّاً من سوليسيتو ونوكس بسلاح الجريمة. كانت ثمّة أيضاً عيّنة ثانية من الحمض النووي على نصل السكّين، وإن تكن صغيرة، مجرّد عدد قليل من الخلايا في الواقع. وعندما تمّ استخراج البصمة الوراثية من الخلايا، تبيّن أنّ التطابق إيجابي مع الضحية كيرشر.

في عام 2011، رفعت نوكس وسوليسيتو دعوى استئناف ضدّ الحكم الطويل بالسجن. وركّز محامو الدفاع بشكل أساسي على تشويه الدليل الوحيد الذي ربط نوكس وسوليسيتو بالجريمة، ألا وهو دليل الحمض النووي الذي وُجد على السكّين.

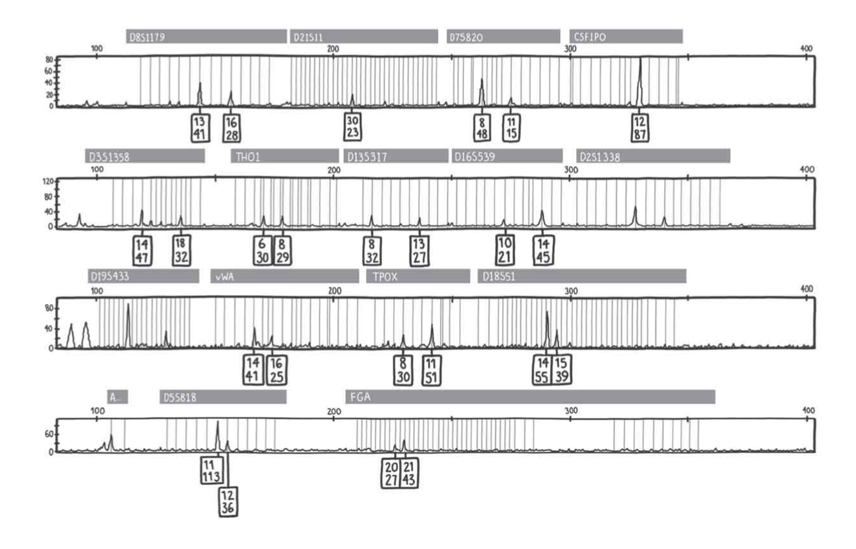
لدى كلّ شخص تقريباً (باستثناء الأشقّاء المتطابقين) جينوماً فريداً - قراءات مؤلّفة من As وTs وCs وGs تميّز السلاسل الطويلة من الحمض النووي في كلّ من خلاياهم. وعند استخراج المعلومات الجينية لجميع أزواج الكروموسوم البالغ عددها نحو ثلاثة مليارات زوج في جينوم الشخص وتخزينها، فإنّ التسلسل الناتج عن ذلك سيشكّل معرّفاً فريداً له. مع ذلك، فإنّ الأوصاف الوراثية المستخدمة في المحكمة، أو المخزّنة في قاعدة بيانات الحمض النووي، ليست قراءات دقيقة للجينوم الكامل للفرد. فعندما تمّ تصميم البصمات الوراثية للمرّة الأولى، تبيّن أنّ استخراج الأوصاف الكاملة للجينوم سيشتمل على كثير من البيانات، وسيستغرق وقتاً طويلاً، فضلاً عن تكلفته الباهظة. كما أنّ المقارنات بين ملفّين ستتطلّب وقتاً هائلاً.

بدلاً من ذلك، تُستخرج البصمة الوراثية عن طريق تحليل 13 موضعاً محدّداً من الحمض النووي للإنسان. وبما أنّنا نرث كروموسوماً من كلّ من والدَينا، فثمّة منطقتان من الحمض النووي مرتبطتان بكلّ موضع. وتتكوّن كلّ من هاتين المنطقتين، جزئيّاً، من «تكرار ترادفي قصير»، أي مقطع صغير من الحمض النووي يتكرّر عدّة مرّات. ويختلف عدد مرّات التكرار في موضع معيّن بشكل كبير بين الأفراد. في الواقع، يتمّ اختيار هذه المواضع الـ 13 على وجه التحديد بسبب تنوّع

عدد المقاطع المتكرّرة فيها، ممّا يعني وجود أعداد هائلة من المجموعات المختلفة من الأرقام المكرّرة عبر المواضع الـ 13. بالتالي، فإنّ البصمة الوراثية هي قائمة أعداد التكرارات في كلّ موضع، والتي يمكن قراءتها من مخطّط يُعرف باسم الرسم الكهربائي. يمثّل المخطّط الكهربائي التسلسل الخام للحمض النووي، ويشبه إلى حدّ ما قراءات مقياس الزلازل، مع ضوضاء خلفية منخفضة المستوى تتخلّلها ذروات في أماكن معيّنة، تقابل كلّ موضع مستخدم في البصمة. وقد عُرض الرسم الكهربائي للعيّنة المستخرجة عن نصل السكّين في الشكل 12.

يمكن تشبيه إنشاء رسم كهربائي فردي بتسجيل نتائج رميَتَين لكلّ من 13 حجر زهر، بالترتيب، علماً أنّ لكلّ حجر 18 جهة. يمكن اعتبار البصمتين الوراثيتين المتطابقتين تماماً لشخصين تمّ اختيارهما عشوائياً مثل رمي التسلسل نفسه مرّتين. في ظلّ ظروف مثالية، يبلغ احتمال تطابق البصمتين الوراثيتين لشخصين تمّ اختيارهما عشوائياً ولا تربط بينهما صلة قرابة دون واحد في المائة تريليون - ممّا يجعل البصمة الوراثية معرّفاً فريداً على نحو فاعل. وإذا تطابقت ذروات بصمتين على المخطّط الكهربائي تطابقاً تامّاً، فمن الممكن الافتراض منطقياً أنّها تنتمي إلى الشخص نفسه.

في بعض الأحيان، قد تكون تطابقات الحمض النووي غامضة لأنّ عمر أو جودة عيّنة الحمض النووي لم تسمح سوى باستخراج أجزاء من البصمة الوراثية، ويتعذّر في هذه الحال الوصول إلى الإشارة في كلّ المواضع. بالنتيجة، لا يمكن أن تعطي البصمات الجزئية تطابقاً حاسماً. من المحتمل أيضاً، خاصّة بالنسبة إلى العيّنات الصغيرة، أن تطغى الضوضاء الخلفية خلال التحليل على الإشارة الصادرة عن المخطّط الكهربائي. لهذا السبب، ثمّة معايير مقبولة بشأن قوّة الإشارات في البصمة الوراثية. وكان هذا هو الأمل الوحيد المتبقّي لدفاع نوكس.



الشكل 12: الرسم الكهربائي لعيّنة الحمض النووي على نصل السكّين، والذي زُعم أنّه ينتمي إلى ميريديث كيرشر. تمّ وضع علامات على الذروات المقابلة للمواضع الـ 13 المستخدمة في البصمة الوراثية القياسية. في بعض الحالات، لا يمكن رؤية أكثر من ذروة واحدة، ممّا يشير إلى أنّ صاحب العيّنة ورث عدد التكرارات نفسه لهذا الموضع من كلا الوالدين. ويعطي الرقم الأعلى في كلّ مربّع عدد مرّات تكرار مقطع الحمض النووي. أمّا الرقم السفلي فيدلّ على قوّة الإشارة. وتعتبر معظم أرقام قوّة إشارة الذروات دون الحدّ الأدنى المطلوب، أي 50.

خلال المحاكمة الأصلية، رأت الدكتورة باتريسيا ستيفانوني، المديرة الفنّية لقسم التحقيق الوراثي الشرعي في شرطة روما، أنّه، نظراً إلى حجم عيّنة الحمض النووي الصغير، فإنّها تحتاج، بدلاً من تقسيم العيّنة الموجودة على السكّين إلى قسمين، إلى استخدام كلّ الحمض النووي المتوافر لإنشاء بصمة وراثية قويّة بما فيه الكفاية. كان هذا مخالفاً بشدّة لأصول الممارسة الجيّدة: فمع عيّنتين، يمكن إعادة التحقّق من آثار الملامح الوراثية منخفضة القوّة أو الغامضة باستخدام العيّنة الثانية. غير أنّ رهانها خسر. فكما أشير في المحاكمة الأصلية، أظهر الرسم الكهربائي ذروات واضحة في جميع الأماكن الصحيحة، وكان مشابهاً بشكل لا يصدّق لبصمة كيرشر الوراثية. مع ذلك، وكما يظهر من المربّعات المرقّمة في الشكل 12، كانت معظم الذروات في البصمة دون أكثر المعايير ارتخاء بكثير. وبما أنّها لم تتّبع الإجراءات المناسبة لإنتاج البصمة الوراثية، فقد تمكّن فريق الدفاع في الاستئناف من التشكيك في دليل الحمض النووي المأخوذ عن السكّين.

ردّاً على ذلك، طلب الادّعاء عدداً قليلاً من الخلايا، فوّتتها العيّنة الأصلية، ولكن اكتشفها خبراء الطبّ الشرعي المستقلّون، وذلك لإعادة اختبارها وتأكيد نتائج الاختبار الأوّل. فرفض رئيس المحكمة، كلاوديو هيلمان، طلبات الادّعاء بإعادة اختبار العيّنة الصغيرة.

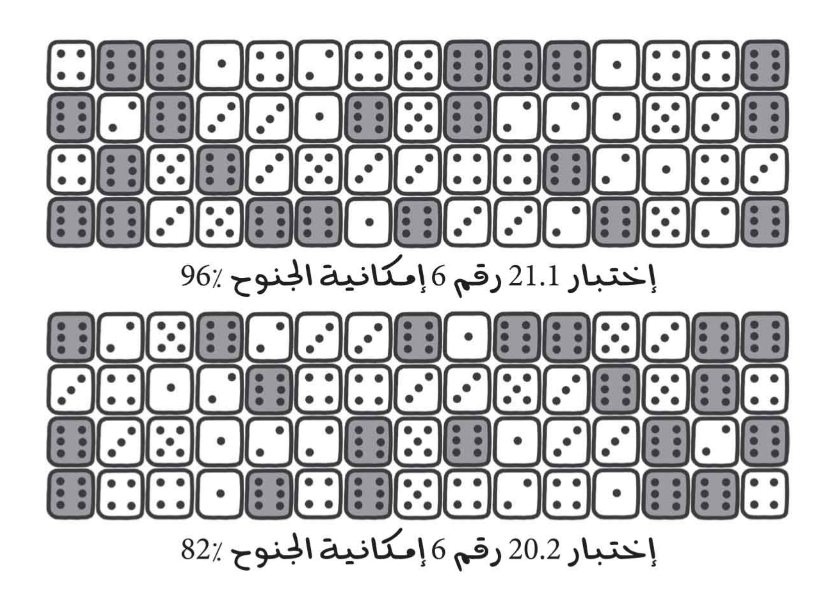
في الثالث من أكتوبر 2011، انسحبت هيئة المحلّفين المكوّنة من قضاة وأشخاص عاديين للنظر في الحكم. طال اجتماعها أكثر من المتوقّع لتعود إلى قاعة المحكمة التي كان جوّها يزداد توتّراً وترقّباً. فعلى الرغم من كلّ الأدلة التي تمّت مراجعتها، لم يعرف أحد إلى أيّ جهة بالفعل ستميل كفّة الميزان. أثناء قراءة الأحكام، انهارت نوكس على مقعدها وأجهشت بالبكاء، فرحاً وارتياحاً. فقد برّأتها هيئة المحلّفين من مقتل كيرشر. وفي ملخّص الدوافع، صرّح القاضي هيلمان، وهو يبرّر رفضه السماح بإعادة اختبار الحمض النووي للسكّين للمرّة الثانية أنّ «مجموع نتيجتين، كلتاهما غير موثوقة لأنّه لم يتمّ الحصول عليها بواسطة إجراء علمي صحيح، لا يمكن أن يؤدّي إلى نتيجة موثوقة». لكنّ ليلى شنيبس وكورالي كولميز، مؤلّفتا الكتاب الصادر عام 2013 تحت عنوان، *الرياضيّات في المحاكمة: حُسن وسوء استخدام الرياضيّات في قاعة المحكمة Maths on Trial: how numbers get used and abused in the courtroom*. تشيران إلى أنّ القاضي هيلمان كان مخطئاً. ففي بعض الأحيان، يُعتبر اختباران غير موثوقان أفضل من واحد[76].

لفهم حجّتهما، تخيّل أنّنا، بدلاً من اختبار الحمض النووي لمطابقة عيّنتين، فإنّنا نرمي حجر نرد. ونودّ أن نحدّد ما إذا كان النرد عادلاً أم لا، في هذه الحالة، يجب أن نحصل على ستّة سدس الوقت، أو بعبارة أخرى، إذا كان الحجر مرجّحاً، فيجب أن تظهر الستّة 50% من الوقت. ولأنّنا لا نريد أن نفترض مسبقاً أيّ شيء عن الوضع، فلنعتبر، قبل إجراء اختباراتنا، أنّ كلّ من هذه السيناريوهات محتمل بشكل متساوٍ.

نبدأ بإجراء اختبار نقوم فيه برمي حجر نرد 60 مرّة. إذا كان الحجر غير مرجّح (أي سليماً)، فإنّنا نتوقّع الحصول على الرقم ستّة 10 مرّات في المتوسّط. أمّا إذا كان الحجر مرجّحاً، فنتوقّع الحصول على ستّة 30 مرّة في المتوسط. إذا حصلنا على 30 ستّة أو أكثر خلال التجربة، فإنّنا سنكون واثقين جدّاً من أنّ النرد مرجّح لأنّه من غير المرجّح إلى حدّ بعيد حدوث ذلك عن طريق الصدفة باستخدام حجر نرد غير مرجّح. كذلك، إذا حصلنا على الرقم ستّة 10 مرّات أو أقلّ، فإنّنا سنكون واثقين من أنّ النرد سليم. وإذا تراوح عدد المرّات التي ظهر فيها الرقم ستّة بين 10 و30، فإنّنا نستطيع حساب احتمالية أن يكون النرد مرجّحاً من خلال مقارنة احتمال عدد مرّات ظهور الرقم ستّة مع حجر النرد المرجّح باحتمال الحصول على ذلك العدد مع الحجر غير المرجّح.

في التجربة، نسجّل الرميات الظاهرة في النصف العلوي من الشكل 13 - بما في ذلك ما مجموعه 21 ستّة. يُعتبر احتمال رؤية هذا العدد من الستّات مع حجر نرد غير مرجّح منخفضاً، لا يتجاوز 0.000297 فقط. ومع حجر نرد مرجّح، يبقى احتمال رؤية 21 ستّة ضئيلاً جدّاً، لا يتجاوز

0.00693. ولكنّ الاحتمال أعلى بـ 20 مرّة ممّا لو كان الحجر غير مرجّح. بالتالي، من المرجّح أكثر بكثير أن تأتي الـ 21 ستّة من حجر مرجّح منها من حجر غير مرجّح. ويمكننا إيجاد الاحتمال المشترك لرؤية 21 ستّة ضمن كلّ من هذين السيناريوهين عن طريق جمعهما معاً للحصول على 0.00722. فتكون نسبة هذا الاحتمال الذي يمثّله النرد المرجّح 0.00693 /0.00722، أي ما يساوي 0.96. بالتالي، فإنّ احتمال أن يكون النرد مرجّحاً، يبلغ 96%. وهذا مقنع إلى حدّ ما، ولكن ليس بما فيه الكفاية لإدانة مجرم.



الشكل 13: اختباران منفصلان للنرد. نحصل على 21 ستّة من 60 رمية في الاختبار الأوّل، مقابل 20 ستّة فقط في الاختبار الثاني. ويبدو أنّ الاختبار الثاني يقوّض الأوّل.

للتأكّد، نجري اختباراً ثانياً نرمي فيه حجر النرد 60 مرّة أخرى. في هذه المرّة، إذا قمنا بعدّ الستّات في النصف السفلي من الشكل 13، نجد 20 فقط. وكما يوضح الجدول 9، يبلغ احتمال رؤية هذا العدد من الستّات إذا كان الحجر غير مرجّح 0.000780، أمّا إذا كان مرجّحاً، فيبلغ 0.00364، أي أكثر احتمالاً بنحو خمس مرّات فقط. مع أنّ الاختلاف ليس كبيراً عن نتائج الاختبار الأوّل، إلّا أنّ تطبيق الحساب نفسه يمنح فرصة أقلّ إقناعاً بنسبة 82% بكون الحجر مرجّحاً. يبدو أنّ إجراء هذا الاختبار الثاني ألقى ظلالاً من الشكّ على نتائج الاختبار الأوّل. وبالتأكيد، فإنّ الاختبار الثاني لا يبدو أنّه يؤكد قناعتنا بأنّ حجر النرد مرجّح على نحو لا يدع مجالاً للشكّ.

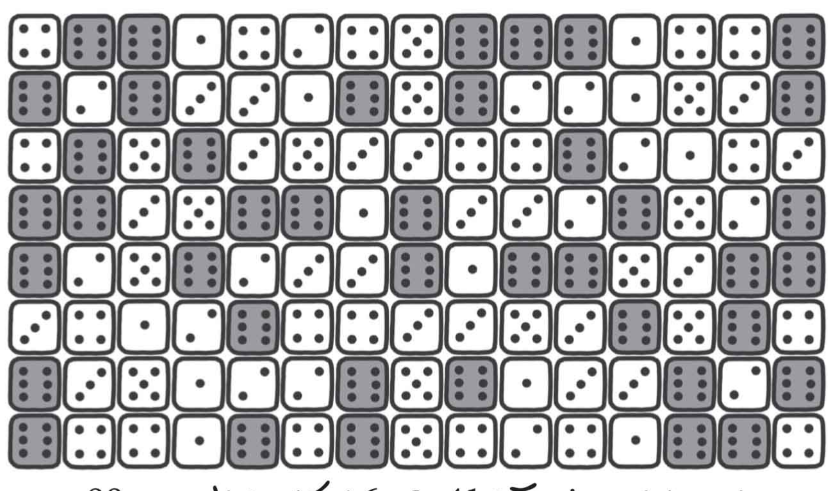
احتمال أن يكون الحجر غير مرجّح	احتمال أن يكون الحجر مرجّحاً	مجموع الاحتمالات في كلا	احتمال أن يكون الحجر مرجّحاً

			السيناريوهين	
الاختبار 1	0.000297	0.00693	0.00722	96%
الاختبار 2	0.000780	0.00364	0.00442	82%
مجموع الاختبارين	0.00000155	0.000168	0.000170	99%

الجدول 9: احتمال رؤية الأعداد المختلفة من الرقم ستّة في كلّ من الاختبارين إذا كان حجر النرد سليماً (العمود 1) أو إذا كان مرجّحاً نحو الرقم ستّة (العمود 2). الاحتمال الإجمالي مع السيناريوهين (العمود 3) واحتمال أن يكون النرد مرجّحاً (العمود 4).

لكن عندما نجمع بين النتائج، كما في الشكل 14، نجد أنّنا رمَينا النرد 120 مرّة. بالنسبة إلى حجر غير مرجّح، نتوقّع الحصول على الرقم ستّة 20 مرّة في المتوسّط. لكن عوضاً عن ذلك، حصلنا عليه 41 مرّة. ويبلغ احتمال رؤية الرقم ستّة 41 مرّة من 120 رمية نرد 0.00000155 إذا كان الحجر غير مرجّح، أمّا لو كان مرجّحاً، فإنّ احتمال الحصول على 41 ستّة يزيد عن 100 مرّة، ويبلغ 0.000168. بالتالي، فإنّ احتمال أن يكون الحجر مرجّحاً في ضوء الـ 41 ستّة يزيد عن 99%.

المثير للدهشة أنّ الجمع بين تحقيقين أقلّ إقناعاً يجعل النتيجة أكثر إقناعاً من أيّ من الاختبارين كلّ على حدة. وغالباً ما تُستخدم تقنية مماثلة في الممارسة العلمية للمراجعات المنهجية. على سبيل المثال، تنظر المراجعات المنهجية في الطبّ في تجارب سريرية متعدّدة، قد لا تكون في حدّ ذاتها قاطعة



الشكل 14: عند الجمع بين الاختبارين، نجد 41 ستّة من إجمالي 120 رمية. وهذا ما يشير إلى احتمال كبير بأن يكون حجر النرد مرجّحاً.

بشأن فاعليّة علاج معيّن بسبب قلّة عدد المشاركين في التجربة. وعند الجمع بين نتائج تجارب مستقلّة متعدّدة، غالباً ما يمكن استخلاص استنتاجات ذات دلالة إحصائية هامّة حول فاعليّة التدخّل أو عدمه. ولعلّ الاستخدام الأكثر شهرة للمراجعات المنهجية يتمثّل في تحليل العلاجات البديلة (التي سنشرح «آثارها الإيجابية» الظاهرية في الفصل التالي، لكونها ناتجة بشكل أساسي عن خدع رياضية)، والتي لا يتوفّر لها سوى تمويل ضئيل لإجراء اختبارات سريرية واسعة النطاق. ومن خلال الجمع بين عدّة اختبارات غير حاسمة في الظاهر، كشفت المراجعات المنهجية عدم فاعلية العلاجات البديلة، بدءاً من استخدام التوت البري لعلاج التهابات المسالك البولية[77]، وصولاً إلى استخدام الفيتامين ج للوقاية من نزلات البرد الشائعة[78].

هكذا، ترى شنيبس وكولميز أنّ الجمع بين اختبارين يُحتمل أن يكونا غير حاسمَين للحمض النووي قد يوفّر دليلاً أقوى عن العلاقة بين حمض كيرشر النووي والسكّين الموجودة في مطبخ سوليسيتو. غير أنّ قرار القاضي هيلمان حرم المحكمة من فرصة سماع هذا الدليل، وأنكر بالتالي على العالم فرصة رؤية الأثر المحتمل لذلك الدليل على نتيجة المحاكمة.

غشاوة رياضية

يبدو أنّ الاحتمالات الصغيرة للغاية الناتجة عن عيّنة كاملة من الحمض النووي تُعتبر إحصائيات مقنعة للغاية، لكن لا يجب أن تعمينا هذه الأرقام الكبيرة جدّاً أو الصغيرة جدّاً في قاعات المحاكم. كما علينا أن نأخذ بعين الاعتبار الظروف التي أنتجت هذه الاحتمالات وأن نتذكّر أنّه، من دون تفسير مناسب، لا يكفي ذكر رقم صغير للغاية بحدّ ذاته خارج السياق لإدانة أو تبرئة مشتبه به.

تُعتبر نسبة الواحد من 73 مليوناً التي أتى بها ميدو في قضيّة سالي كلارك مثالاً على ذلك. فبسبب مزيج من الافتراضات المستقلّة الخاطئة (افتراض أنّ وفاة طفل رضيع بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ لا يغيّر من احتمال وفاة طفل ثانٍ بالمتلازمة نفسها) والمغالطات البيئية (الخطأ في تصنيف الزوجين كلارك في فئة الأشخاص الأقلّ عرضة استناداً إلى بعض التفاصيل الديموغرافية المنتقاة)، كانت النسبة أصغر بكثير ممّا ينبغي أن تكون. وما ساهم في تفاقم هذه المشاكل هو طريقة تقديم هذه النسبة. فلو أنّ هيئة المحلّفين أعملت المنطق، لافترضت أنّ نسبة الواحد من 73 مليوناً هي

احتمال براءة سالي بدلاً من كونها احتمال وجود تفسير بديل لوفاة الرضيعَين - وهذه مغالطة المدّعي العام. وبالفعل، وجدتها هيئة المحلّفين مذنبة استناداً إلى حدّ ما إلى طريقة عرض ميدو لنسبته الخاطئة.

إذا أردنا أن نحذّر من التسرّع في الاقتناع بإدانة شخص ما بسبب احتمالات ضئيلة للغاية، فلا ينبغي لنا أن نقبل ببساطة رفض هذه الأرقام كدليل على براءة هذا الشخص. فقد تعرّض أندرو دين للتشهير بسبب مغالطة المدّعي العام، الأمر الذي جعل احتمال إدانته، استناداً إلى دليل الحمض النووي فحسب، يبدو أكثر ترجيحاً ممّا كان عليه. في الاستئناف، احتجّ محامو الدفاع برقم منقّح هو واحد بالـ 2500 كاحتمال لوجود تطابق في الحمض النووي، ممّا جعله واحداً من آلاف المشتبه بهم في محيط الجريمة الذين يحتمل أن يكونوا مطابقين. وقد يجادل المرء أنّ هذا الأمر يجعل دليل الحمض النووي بلا جدوى. لكنّ هذه الحجّة خاطئة أيضاً وتعرف باسم «مغالطة محامي الدفاع». في الواقع، لا ينبغي إهمال دليل الحمض النووي، بل استيعابه إلى جانب الأدلّة الأخرى التي تورّط أو تبرّئ المشتبه به. اعتُبرت إدانة دِين غير آمنة، وعُزي ذلك جزئيّاً إلى التأثير المضلّل لمغالطة المدّعي العام على رأي هيئة المحلّفين. لكن في إعادة المحاكمة، اعتُبر دين مذنباً وأدين بجريمة الاغتصاب.

بالطريقة نفسها، قدّمت شنيبس وكولميز حجّة رياضية مقنعة مفادها أنّه، من خلال رفض إعادة اختبار الحمض النووي، ربّما يكون القاضي هيلمان، الذي ترأّس جلسة الاستئناف في قضية أماندا نوكس، قد ساعد في إبقائها طليقة. في عام 2013، تمّ إلغاء حكم براءة نوكس، وأمر القاضي بإعادة اختبار عيّنة الحمض النووي الثانية. فأثبت الاختبار أنّ الحمض النووي ينتمي بالفعل إلى نوكس نفسها. وفي الاستئناف الأخير، عام 2015، استمع القضاة إلى أدلّة تفيد أنّ عملية إحضار السكّين وفحصها لم تتمّ حسب الأصول. وتراوحت الأخطاء من إحضار السكّين وتخزينها في مغلّف غير مختوم، ومن ثمّ في صندوق كرتوني غير معقّم، إلى عدم ارتداء ضبّاط الشرطة الملابس الواقية الصحيحة، وحتّى تواجد أحد الضبّاط في شقّة كيرشر قبل نقل السكّين في وقت لاحق من ذلك اليوم. كان من الصعب أيضاً استبعاد التلوّث في المختبر، إذ تمّ اختبار ما لا يقلّ عن 20 من عيّنات كيرشر في المختبر قبل فحص سلاح الجريمة المزعوم. فلو أنّ الحمض النووي الأصلي الموجود على السكّين قد أتى بالفعل عن طريق التلوّث، فإنّ الاختبارات لن تغيّر حقيقة انتماء الحمض النووي إلى كيرشر أو تجيب على كيفية وصوله إلى السكّين، مهما بلغ عددها. في الواقع، لو توفّر عدد أكبر

من عيّنات الحمض النووي الملوّثة، فإنّ اقتراح إعادة الاختبار سيعطي المزيد من الحجج الخاطئة لإدانة نوكس.

عند التعلّق بتفاصيل حجّة رياضية متقنة، أو عمليّة حسابية معقّدة، أو رقم جذّاب، فإنّنا غالباً ما نتجاهل طرح سؤال بديهي للغاية: هل هذه العمليّة الحسابية هي ذات صلة في الأساس؟

* * *

في قضيّة سالي كلارك، كانت الإحصائيّة التي أثّرت بدرجة كبيرة على المحلّفين هي تقدير ميدو لإمكانيّة وفاة طفلَين في أسرة واحدة بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ. وعند إجراء تحليل أكثر دقّة، قد نتساءل عن سبب احتساب هذا الرقم أساساً. فما من أحد في المحاكمة جادل بمسألة وفاة الطفلين بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ. عند وفاة كريستوفر، أكّد الطبيب الشرعي الذي فحص الجثّة أنّ كريستوفر توفّي بسبب إصابة في الجهاز التنفّسي السفلي. وهذا لا يعني تشخيصاً بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ، الذي تمّ التوصّل إليه بعد استبعاد كلّ الأسباب الأخرى. فقد ادّعى الدفاع أنّ الأسباب طبيعية، بينما ادّعى الادّعاء أنّها جريمة قتل، لكنّ أحداً لم يقترح اعتبار متلازمة موت الرضّع المفاجئ سبباً لوفاة كلا الطفلين. أمّا الرقم الذي أعطاه ميدو لوصف احتمال وفاة طفلين بمتلازمة موت الرضّع المفاجئ في أسرة واحدة فلم يكن له أيّ علاقة بالمحاكمة. مع ذلك، يبدو أنّ هذا الرقم شكّل عاملاً مهمّاً في أذهان المحلّفين عندما توصّلوا إلى إدانة سالي بقتل ولديها.

في الاستئناف الثاني الذي رُفع في يناير 2003، قدّم محامو سالي أدلّة جديدة اكتُشفت بعد الإدانة الأصلية. تشير الأدلّة المستقاة من فحص جثّة ابن سالي الثاني، هاري، بوضوح إلى وجود بكتيريا المكوّرات العنقودية الذهبية في سائله النخاعي. وبحسب الخبراء، من المحتمل جدّاً أن تكون هذه العدوى قد أدّت إلى شكل من أشكال التهاب السحايا الجرثومي الذي تسبّب في وفاة هاري. وعلى الرغم من أنّ الأدلّة الميكروبيولوجية الجديدة كانت كافية لاعتبار إدانة سالي غير مأمونة، أشار قضاة الاستئناف إلى أنّ إساءة استخدام الإحصائيات في المحاكمة الأصلية كانت كافية للتمسّك بالاستئناف.

في 29 يناير، تمّ إطلاق سراح سالي. فعادت إلى ستيف وابنهما الثالث، الذي كان قد بلغ الرابعة من عمره في ذلك الوقت. وفي بيان أُلقِي عند إطلاق سراحها، تحدّثت عن السماح لها أخيراً بالحزن على وفاة طفليها، وعن أهمّية العودة إلى زوجها وابنها الصغير ليصبحوا «أسرة حقيقية مجدّداً». وعلى الرغم من سعادتها العارمة باجتماع شملها مع أسرتها، إلّا أنّ هذه المكافأة لم تكن

كافية للتعويض عن السنوات التي أمضتها في السجن عن غير وجه حقّ، وعن لومها في قتل طفليها الأغلى على قلبها. وفي مارس 2007، عُثر عليها ميتة في منزلها نتيجة التسمّم بالكحول، ذلك أنّها لم تتعاف بالكامل من آثار إدانتها ظلماً.

* * *

يمكننا استخدام الدروس المستفادة في قاعة المحكمة في مجالات أخرى من حياتنا. فكما سنرى في الفصل التالي، من الحكمة بمكان التعامل بشيء من التشكّك مع الأرقام التي تسترعي اهتمامنا في عناوين الصحف، أو الادّعاءات التي تحفل بها الإعلانات، أو العبارة التي نلتقطها من أصدقائنا في لعبة الهاتف. في الواقع، في أيّ مجال يكون لدى جهة ما مصلحة أكيدة في التلاعب بالأرقام، وهذا أمر يحدث في كلّ مكان تقريباً، يجب أن نتعامل مع المزاعم بتشكّك ونطلب مزيداً من التوضيح. وكلّ من هو واثق من صحّة أرقامه سيكون مسروراً بتقديم هذا الإيضاح. فمن الصعب فهم الرياضيّات والإحصاء، حتّى بالنسبة إلى علماء الرياضيّات المدرَّبين، ولهذا السبب لدينا خبراء في هذه المجالات. بالتالي، اطلب عند الضرورة مساعدة أحد المحترفين، شخص مثل بوانكاريه، يمكنه تقديم رأي خبير. وأيّ عالم رياضيّات يستحقّ اسمه سيسرّ بذلك. والأهمّ من ذلك، قبل أن تعمي بصيرتنا العمليّات الحسابية المعقّدة، يجب علينا أن نتساءل بدقّة ما إذا كانت الرياضيّات أداة مناسبة لاستخدامها في مجال معيّن.

لا شكّ في أنّه مع تزايد انتشار أشكال من الأدلّة قابلة للقياس الكمّي، أصبح للحجج الرياضية دور لا غنى عنه في بعض أجزاء نظامنا القضائي الحديث. ولكن إذا استُعملت الرياضيّات بطريقة خاطئة، فمن شأنها أن تعوّق العدالة وتكلّف الأبرياء سمعتهم، وفي بعض الحالات، حياتهم أيضاً.

4
لا تصدّق الحقيقة: فضح زيف إحصائيّات وسائل الإعلام

لا تصدّق الحقيقة كان عنوان الألبوم السادس لفرقة أواسيس لموسيقى الروك التي تأسّست في مانشستر. وبما أنّني نشأتُ في المدينة نفسها في تسعينيات القرن المنصرم، فقد كنت مولعاً بالفرقة. حضرتُ حفلاتها عدّة مرّات في جميع أنحاء المدينة، وبعد صدور هذا الألبوم مباشرة، في عام 2005، ذهبت لحضور حفلة لها في مدرّج مدينة مانشستر، موطن نادي مدينة مانشستر لكرة القدم الذي أعشقه. عندما كنت مراهقاً، كنت أذهب بانتظام إلى الحفلات التي كانت تقام في عدّة أماكن حول مانشستر: أبولو، نايت أند داي، رودهاوس، وكانت الفرق الأكبر تحيي حفلاتها في مانشستر أرينا.

بحلول عام 2017، كانت فرقة أواسيس قد حُلّت منذ فترة طويلة، ولم أكن أعيش في مانشستر أو أحضر حفلات منذ أكثر من 10 سنوات، لكنّ العديد من الأماكن التي كنت أرتادها ما زالت ناشطة. ففي 22 مايو من ذلك العام، نحو الساعة العاشرة والنصف مساءً، كان حفل أريانا غراندي قد انتهى للتوّ في مانشستر أرينا. وكان الجمهور، وكثير منهم من المراهقين أو الأولاد الأصغر سنّاً، يتوافدون إلى البهو للقاء أهاليهم الذين ينتظرونهم. وسط الحشد، وقف سلمان عابدي البالغ من العمر 23 عاماً بلا حراك. كان يحمل على ظهره حقيبة تحتوي على قنبلته محلّية الصنع. وعند الساعة 22:31، قام بتفجيرها. أسفر الانفجار عن مقتل 22 ضحية من الأبرياء وجرح مئات آخرين. وكان هذا أسوأ هجوم إرهابي على أراضي المملكة المتّحدة منذ تفجيرات عام 2005، التي استهدفت شبكة النقل في لندن، وذهب ضحيّتها 56 شخصاً.

لم أكن في مانشستر في وقت الهجوم، ولا حتّى في المملكة المتّحدة، بل كنت في رحلة عمل إلى المكسيك. وبسبب الفارق الزمني البالغ 6 ساعات، شاهدتُ التقارير التي تحدّثت عن الهجوم وهي تصدر واحداً تلو الآخر مع تقدّم الوقت في فترة الظهيرة بينما كان معظم سكّان المملكة مستغرقين في النوم، وغير مدركين لما جرى. على الرغم من أنّني كنت على مسافة تزيد عن

5000 ميل، إلّا أنّني سبق أن تواجدت في هذا البهو في الماضي، الأمر الذي جعلني أشعر أنّني معنيّ أكثر بالحادثة التي سبّبت لي من الصدمة والخوف أكثر من العديد من الحوادث الإرهابية الأخيرة. خلال الأيّام القليلة التالية، قرأت قدر استطاعتي عن الهجوم وكيف كان ردّ فعل الناس في مسقط رأسي. ولفت انتباهي على نحو خاصّ مقال في صحيفة *ديلي ستار* تحت عنوان «للتواريخ أهمّيتها لدى الجهاديين، هجوم مانشستر أرينا في ذكرى لي ريغبي». وفيه، سلّط المؤلّف الضوء على تغريدة لسيباستيان غوركا، الذي كان مساعد نائب الرئيس الأميركي دونالد ترامب آنذاك، وكان نصّها كالآتي: وقع انفجار مانشستر في الذكرى الرابعة لمقتل فوزيلير لي ريغبي. هل للتواريخ أهمّيتها لدى الإرهابيين الجهاديين؟

لاحظ غوركا تصادفاً بين تاريخَي هجومين إرهابيين. وقع الأوّل في 22 مايو 2013، وكان هجوماً بخنجر على جندي من الجيش البريطاني من قبل مسيحيَّين من أصل نيجيري تحوّلا إلى الإسلام. ووقع الثاني في 22 مايو 2017، وفيه استهدف التفجير الانتحاري هدفاً غير سياسي من قبل مسلم من أصول ليبية. وقد أشار غوركا في تغريدته إلى أنّ هجوم مانشستر أرينا خُطّط له بدقّة لينفَّذ في ذكرى مقتل لي ريغبي. بالطبع، لو كان هذا صحيحاً، لأعطى مصداقيّة أكبر لفكرة كون الإرهابيين مجموعة منظّمة ومتماسكة، قادرة على توجيه ضرباتها متى شاءت. غير أنّ هذه النظريّة تتعارض إلى حدّ ما مع صورة «الذئب الوحيد» التي رُسمَت لعابدي منذ ذلك الحين.

يبدو أنّ التنظيم يجعل الجماعة الإرهابية أكثر تهديداً ممّا لو بدت هجماتها عشوائية، غير خاضعة لسيطرة مركزية، ولا تتّسم بالتماسك. ويبدو أنّ الغرض من تغريدة غوركا هو زيادة الخوف من الإرهاب، لعلّه بهدف دعم الأمر التنفيذي للرئيس ترامب: «حماية الأمّة من دخول الإرهابيين الأجانب إلى الولايات المتّحدة»، الذي يمنع الكثير من المسلمين من السفر إلى الولايات المتّحدة، والذي كان، في ذلك الوقت، يواجه عدّة تحدّيات قانونية. فأخذت أتساءل عن مدى صحّة ذلك حقّاً. هل يجب أن نصدّق تأكيد غوركا، الذي أعطته ديلي ستار مصداقية بنشره على صفحاتها؟ أليس هذا نوعاً من الخطابة التي لا أساس لها من الصحّة والتي تخدم تماماً أهداف الإرهابيين؟ تساءلت أيضاً، ما مدى احتمال وقوع حادثين إرهابيّتين في اليوم نفس من العام، بمحض الصدفة؟

* * *

يتمّ إمطارنا بالأرقام باستمرار: في ما نقرأه، وما نراه، وما نسمعه. وتتراكم الدراسات الكبيرة حول الطرق التي تؤثّر بها أنماط الحياة في القرن الحادي والعشرين على صحّتنا مثلاً بشكل

أسرع من أيّ وقت مضى[79]. في الوقت نفسه، ترافق ذلك زيادة في المهارات العددية اللازمة لتفسير النتائج التي تمّ التوصّل إليها. وفي كثير من الحالات، لا توجد أجندة خفيّة، بل يصعب تفسير الإحصائيات بكلّ بساطة. مع ذلك، ثمّة عديد من الأسباب التي تجعلها مفيدة لطرف أو لآخر في فهم اكتشاف معيّن.

في عصر الأخبار المزيّفة، من الصعب معرفة الجهة التي ينبغي الوثوق بها. صدّق أو لا تصدّق، إلاّ أنّ أغلب وسائل الإعلام الرئيسة تبني معظم قصصها على الحقائق. ذلك أنّ الصدق والدقّة يحتلّان تقريباً قمّة اللائحة على جميع مدوّنات قواعد الأخلاقيات والنزاهة الصحفية تقريباً[80]. فبالإضافة إلى الالتزامات الأخلاقية بنشر الحقيقة، من شأن قضايا التشهير أن تكون مدمّرة ومكلفة للغاية، لذلك ثمّة حافز مالي لنشر الحقائق من دون تحريف.

أمّا النقطة التي تختلف فيها العديد من المؤسّسات الإعلامية في تقاريرها عن الوقائع فتتمثّل في وجهة النظر التي تعرض بها القصّة. على سبيل المثال، عندما تمّ إقرار مشروع قانون الإصلاح الضريبي الذي أصدره الرئيس ترامب (وعنوانه هو نفسه لا يخلو من المواربة: «قانون تخفيض الضرائب وفرص العمل») في ديسمبر 2017، صرّح الصحفي إد هنري على قناة فوكس أنّه «نصرٌ كبير» و«فوزٌ للرئيس هو في أمسّ الحاجة إليه». بالمقابل، قال لورانس أودونيل على MSNBC، مشيراً إلى أعضاء مجلس الشيوخ الجمهوريين الذين صوّتوا لصالح مشروع القانون، إنّه «أشنع عرض رأيته في الكونغرس لحيوانات في زريبة». وطرح جايك تابر على قناة سي إن إن السؤال التالي، «هل سبق أن أقرّ الكونغرس تشريعاً كبيراً بدعم أقلّ [شعبية]؟».

لن تواجه أيّ صعوبة في اكتشاف التحيّز اللفظي المستخدم في القصّة أعلاه، والتوصّل إلى استنتاجات حول البرامج السياسية التي تروّج لها المنافذ الإخبارية الثلاثة. فمن السهل اكتشاف التحزّب عبر التعابير التي يستخدمها الناس. بالمقابل، من الأسهل على الأرقام أن تعمل خلسة. فمن الممكن اختيار الإحصائيات لتقديم القصّة من زاوية معيّنة. بينما يتمّ تجاهل أرقام أخرى وإنشاء قصص مضلّلة عن طريق الإغفال وحسب. وفي بعض الأحيان تكون الدراسات نفسها غير موثوقة. إذ يمكن للعيّنات الصغيرة أو غير الممثِّلة للواقع أو المنحازة، بالاقتران مع الأسئلة الموجِّهة والتقارير الانتقائية، أن تقدّم إحصائيّات مغلوطة. والأخطر من ذلك الإحصائيّات المستخدمة خارج السياق، بحيث لا نملك طريقة للحكم على ما إذا كانت الزيادة بنسبة 300% مثلاً في حالات المرض تمثّل زيادة من مريض واحد إلى 4 أو من 500,000 إلى مليوني مريض. السياق مهمّ. ليس لأنّ هذه التفسيرات المختلفة للأرقام عبارة عن أكاذيب - كلّ منها يمثّل جزءاً صغيراً من القصّة الحقيقية

التي ألقى شخص ما الضوء عليها من زاويته المفضّلة - بل لأنّها ليست الحقيقة الكاملة. وعلينا أن نحاول تجميع القصّة الحقيقية الكامنة وراءها.

في هذا الفصل، سنقوم بتحليل الحيل والأفخاخ والتحوّلات التي ضُمّنت، عن قصد أو غير قصد، في عناوين الصحف، ولوحات الإعلانات، والمقاطع الصوتية السياسية وإزالة الغموض عنها. سنكشف عن عمليّات تلاعب رياضية مماثلة تستخدم في أماكن متوقّعة أكثر، مثل منشورات النصائح للمرضى وحتّى في المقالات العلميّة. كما سنعرض طرقاً بسيطة لنعرف متى لا يتمّ إخبارنا بالقصص الكاملة، فضلاً عن أدوات تساعدنا على كشف حقيقة الإحصائيات، ومعرفة متى نصدّق «الحقيقة».

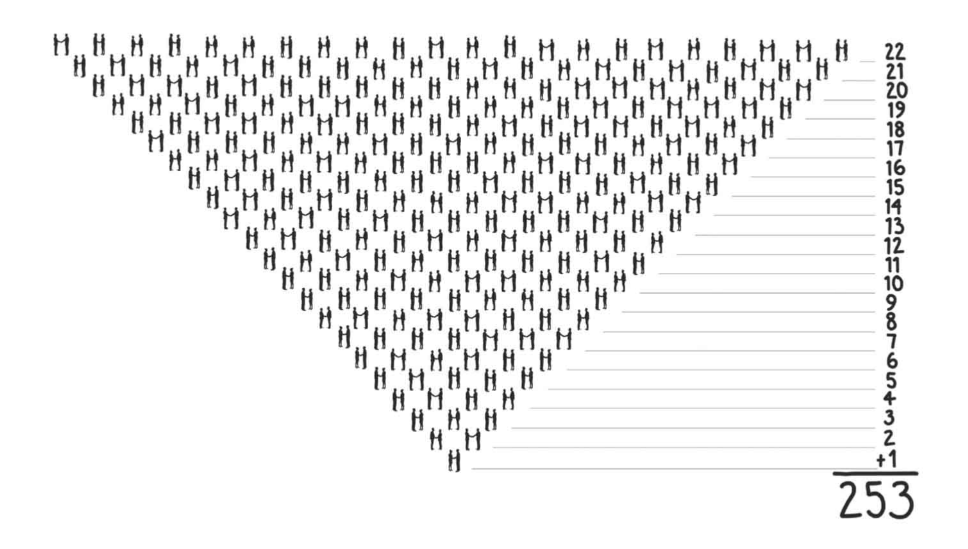
مسألة حفل الميلاد

من أكثر أشكال التضليل الرياضي براعة وفاعلية هي تلك التي لا يبدو فيها أنّه ثمّة رقم مستخدم. فبالقول «للتواريخ أهمّيتها لدى الإرهابيين»، كان غوركا يطلب منّا ضمناً تقييم احتمال وقوع حادثتين إرهابيتين في اليوم نفسه بمحض الصدفة، موضحاً أنّه لا يعتقد حقّاً بإمكانية ذلك. وتكمن طريقة اكتشاف الإجابة الحقيقية في تجربة فكرية رياضية تُعرف باسم «مسألة حفل الميلاد».

تطرح مسألة حفل الميلاد السؤال التالي «كم عدد الأشخاص الذين ترغب في حضورهم إلى حفل ميلاد قبل أن يرتفع احتمال حضور شخصين على الأقلّ ولدوا في اليوم نفسه إلى ما فوق 50%؟». عندما طُرحت هذه المسألة للمرّة الأولى، استقرّ الناس على الرقم 180، الذي يقارب نصف عدد أيّام السنة. هذا لأنّنا نميل إلى التفكير في احتمال أن يصادف تاريخ ميلاد شخص آخر مع تاريخ ميلادنا. في الواقع، يعتبر الرقم 180 كبيراً جدّاً. فإذا افترضنا أنّ أيّام الميلاد موزّعة بالتساوي تقريباً على مدار العام، فإنّ الإجابة ستكون 23 شخصاً فقط. وهذا لأنّنا لسنا معنيّين باليوم الذي يصادف فيه تاريخ الميلاد، بل فقط في ما إذا كان ثمّة تطابق.

لمعرفة سبب كون الرقم المطلوب منخفضاً للغاية، يمكننا أن نبدأ بمعرفة عدد أزواج الأشخاص الموجودين في الغرفة - فموضوعنا في النهاية هو يومَا ميلاد يصادفان في التاريخ نفسه. لحساب عدد الأزواج بوجود 23 شخصاً في الغرفة، تخيّل اصطفاف الجميع والطلب منهم مصافحة بعضهم البعض. فيصافح الشخص الأوّل 22 شخصاً آخر، ويصافح الثاني الـ 21 شخصاً الذين لم يصافحهم بعد، ويصافح الثالث 20 شخصاً آخرين، وهكذا دواليك. أخيراً، يصافح الشخص ما قبل

الأخير الشخص الأخير، فيكون علينا إضافة 22 + 21 + 20 + ... + 1. هذا شاقّ، لكنّه سهل إلى حدّ ما بوجود 23 شخصاً، غير أنّه يصبح مملاً عندما يتجاوز عدد الأشخاص في الغرفة الـ 50. تُدعى عمليّات الجمع كهذه - المؤلّفة من أعداد كاملة تبدأ من الرقم واحد - بالأعداد المثلّثية، إذ يمكننا وضع هذه الأرقام في صفوف مثلّثية مرتّبة، كما فعلنا في الشكل 15. لحسن الحظّ، ثمّة صيغة مرتّبة للأعداد المثلّثية. فبالنسبة إلى عدد عامّ من الأشخاص، N، في الغرفة، نحصل على عدد المصافحات من خلال الصيغة التالية: $N \times (N - 1)/2$. وفي حالة الـ 23 شخصاً، فإنّنا نحصل على $23 \times 22/2$ أو 253 زوجاً. ربّما ليس من المستغرب إذاً أن يرتفع احتمال وجود زوج واحد على الأقلّ من الأشخاص الذين ولدوا في التاريخ نفسه إلى ما فوق 50% مع وجود هذا العدد الكبير من الأزواج في الغرفة.



الشكل 15: عدد المصافحات بين 23 شخصاً. يصافح الشخص الأوّل 22 شخصاً آخر، ويصافح الثاني 21 شخصاً، وهكذا دواليك إلى أن يصافح الشخص ما قبل الأخير شخصاً واحداً. ويبلغ إجمالي عدد المصافحات بين 23 شخصاً مجموع أوّل 22 عدداً صحيحاً. استناداً إلى صيغة العداد المثلّثية، ثمّة 253 زوجاً من الأشخاص مع وجود 23 شخصاً فقط في الغرفة.

لإعطاء رقم لهذا الاحتمال، من الأسهل التفكير أوّلاً في احتمال عدم اشتراك أحد في تاريخ الميلاد. وهذه هي بالضبط التقنية الرياضية نفسها التي استخدمناها في الفصل 2 عند حساب عدد صور الثدي الشعاعية التي قد تجريها المرأة قبل أن يرتفع احتمال حصولها على تشخيص إيجابي كاذب إلى ما فوق 1/ 2. مع أيّ زوج واحد من الأشخاص، يمكننا بسهولة اكتشاف احتمال عدم مشاركتهما يوم الميلاد. فمن شأن الشخص الأوّل أن يكون قد وُلد في أيّ يوم من أيّام السنة الـ 365،

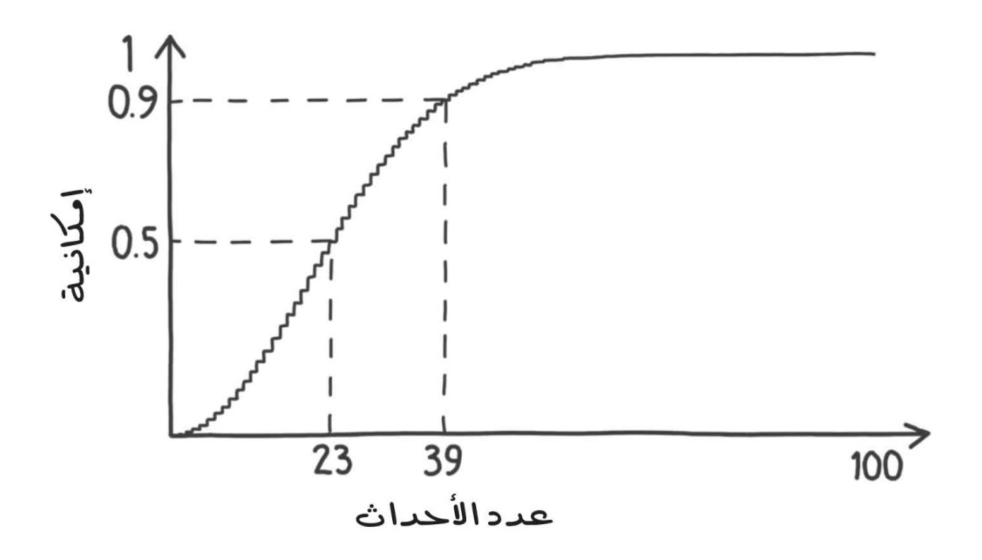
والثاني في أيّ من الأيّام الـ 364 المتبقّية. بالتالي، فإنّ احتمال عدم مشاركة زوج واحد من الأشخاص تاريخ الميلاد نفسه يجاور حدّ اليقين، إذ يبلغ 364/ 365 (أو 99.73%). مع ذلك، نظراً لوجود 253 زوجاً من الأشخاص، ونظراً لكوننا مهتمّين بمعرفة احتمال عدم مشاركة أيّ منهم تاريخ ميلاده مع شخص آخر، نحتاج إلى أن يكون لكلٍّ من الأزواج الآخرين البالغ عددهم 252 زوجاً من الأشخاص تواريخ ميلاد مختلفة أيضاً. إذا كانت كلّ هذه الاقترانات مستقلّة عن بعضها البعض، فإنّ احتمال عدم مشاركة أيّ من الأزواج البالغ عددهم 253 تاريخَ الميلاد نفسه يمكن حسابه عن طريق احتمال عدم مشاركة زوج واحد تاريخ الميلاد، 364/ 365، مضروباً بنفسه 253 مرّة أو $(364/365)^{253}$. ومع أنّ 364/ 365 يقارب الواحد، إلّا أنّه عند ضربه بنفسه مئات المرّات، يصبح احتمال عدم وجود شخصين مطابقَين 0.4995، أي أقلّ بقليل من 1/ 2. وبما أنّ عدم تطابق تاريخ الميلاد بين أحد أو تطابق تاريخ الميلاد بين شخصين أو أكثر هما الاحتمالان الوحيدان (باللغة الرياضية «شاملان جماعياً») يجب أن يكون مجموع احتمال الحدثين واحد. بالتالي، فإنّ احتمال تطابق تاريخ الميلاد لدى شخصين أو أكثر يبلغ 0.5505، أي أكثر من 1/ 2 بقليل.

في الواقع، لن تكون جميع أزواج تواريخ الميلاد مستقلّة عن بعضها البعض. فإذا كان تاريخا ميلاد الشخص أ والشخص ب مطابقَين، وكان تاريخا ميلاد الشخص ب والشخص ج مطابقَين، فنحن نعلم أنّه ثمّة اقتران بين الشخصين أ وج من حيث تاريخ الميلاد، وبالتالي لم يعودا مستقلَّين. ولو كانا مستقلَّين، لكانت فرصة تطابق تاريخَي ميلادهما لا تتجاوز 1/ 365. من هنا فإنّ الحساب الدقيق لاحتماليّة المطابقة، مع أخذ هذه التبعيّات بعين الاعتبار، معنيّ أكثر بقليل ممّا كان عندما أخذنا بفرضيّة الاستقلال في الفقرة السابقة. فهو يعتمد على التفكير في إضافة الأشخاص إلى الغرفة واحداً تلو الآخر. في حال وجود شخصين، أثبتنا أنّ احتمال عدم تطابق تاريخَي ميلادهما يبلغ 364/ 365. وبإضافة شخص ثالث إليهما، يمكن أن يصادف تاريخ ميلاد هذا الشخص في أيّ من الأيّام الـ 363 المتبقّية من العام، إذا لم يكن تاريخ ميلاده مطابقاً لأيّ من الشخصين الآخرَين. بالتالي فإنّ احتمال عدم تطابق تواريخ ميلاد الأشخاص الثلاثة هو كالتالي: (364/ 365) × (363/ 365). ومن شأن تاريخ ميلاد الشخص الرابع أن يصادف في أيّ من الأيّام الـ 362 المتبقّية، بحيث ينخفض احتمال عدم تطابق تواريخ ميلاد الأشخاص الأربعة إلى (364/ 365) × (363/ 365) × (362/ 365). ويستمرّ النمط إلى أن نضيف الشخص الثالث والعشرين إلى المجموعة. فيكون تاريخ ميلاده في أيّ من الأيّام الـ 343 المتبقّية من العام. ويتمّ حساب احتمال عدم مطابقة تواريخ ميلاد الأشخاص الـ 23 على الشكل التالي:

$$\frac{364}{365} \times \frac{363}{365} \times \frac{362}{365} \times \ldots \times \frac{343}{365}.$$

تشير هذه المعادلة إلى أنّ الاحتمال الدقيق لعدم تطابق تاريخ ميلاد شخصين في مجموعة مكوّنة من 23 فرداً (مع أخذ التبعيات المحتملة بعين الاعتبار) يبلغ 0.4927، أي دون النصف بقليل. وباستخدام فكرة الشمول الجماعي مجدّداً، يكون للإمكانيّة الأخرى الوحيدة - أي تطابق تاريخ ميلاد شخصين على الأقلّ - احتمال يزيد بقليل عن النصف، ويبلغ 0.5073. عندما يصبح عدد أفراد المجموعة 70 شخصاً، نصبح أمام 2415 زوجاً من الأشخاص. ويشير الحساب الدقيق إلى أنّ احتمال حدوث تطابق يُعتبر كبيراً للغاية، ويبلغ 0.999. يوضح الشكل 16 كيف يتغيّر احتمال وقوع حدثين في اليوم نفسه من العام مع ازدياد عدد الأحداث المستقلّة التي نأخذها بالاعتبار من 1 إلى 100.

استخدمتُ النتائج المذهلة لمشكلة عيد الميلاد لإثارة إعجاب الناشر عندما التقينا لأوّل مرّة لمناقشة تأليف هذا الكتاب. وتحدّيته على جولة شراب ثانية أنّني قادر على العثور على شخصين، في المقهى الهادئ نسبيّاً، يتشاركان تاريخ الميلاد نفسه. وبعدما تفحّص الغرفة بسرعة، قبل التحدّي على الفور، لا بل عرض أن يدفع ثمن جولتين من الشراب إذا عثرت على هذين الشخصين، ظنّاً منه أنّ احتمال التطابق بعيد للغاية. بعد 20 دقيقة وكثير من نظرات الحيرة



الشكل 16: يرتفع احتمال وقوع حدثين أو أكثر في يوم واحد مع عدد الأحداث. فعند وجود 23 حدثاً، يصبح احتمال التطابق أعلى بقليل من النصف. وعند وجود 39 حدثاً مستقلّاً، يرتفع احتمال وقوع حدثين على الأقلّ في اليوم نفسه إلى 0.9 تقريباً.

والتبريرات الزائفة لاحقاً (قلت للناس الذين تحدّثت إليهم: «لا بأس، أنا عالم رياضيّات»)، وجدت شخصين ولدا في التاريخ نفسه، وخسر كريس التحدّي. ربما لم يكن الأمر عادلاً من جانبي، غير أنّني حسبت أساساً عدد الزبائن ذهنياً عندما قمت لطلب الجولة الأولى من الشراب، وكانت الحصيلة 40 زبوناً. ومع هذا العدد، كانت فرصة خسارتي التحدّي تبلغ 11% فقط. كان ينبغي أن أتحدّى كريس على الجولتين التاليتين، وليس العكس. غير أنّ الاحتمال الكبير لمطابقة عدد منخفض من الأحداث له بعض التداعيات الأعمق، التي تتجاوز استغلال الضحايا الأبرياء في المقهى ببعض المعادلات الرياضية السهلة. على وجه الخصوص، يمكن أن يساعدنا في اختبار الإشارة الضمنية التي أوردها غوركا بشأن قدرة الجهاديين على توجيه ضرباتهم عند الرغبة.

خلال فترة الخمس سنوات الممتدّة بين أبريل 2013 وأبريل 2018، ارتكب إرهابيون ما لا يقلّ عن 39 هجوماً إرهابياً على دول غربية (الاتّحاد الأوروبي أو أميركا الشمالية أو أستراليا). للوهلة الأولى، يبدو من غير المرجّح وقوع هجومَين منها في تاريخ واحد إذا كانت تنفَّذ بشكل عشوائي على مدار العام. مع ذلك، نظراً لوجود 741 زوجاً محتملاً من الأحداث، من المحتمل جدّاً أن وقوع حدثَين في التاريخ نفسه، وهو احتمال تبلغ نسبته نحو 88%، كما هو موضّح في الشكل 16. ومع هذا الاحتمال الكبير، يجب أن نفاجأ جدّاً بعدم وقوع هجومين من تلك الهجمات في التاريخ نفسه. بالطبع، هذا لا يكشف شيئاً عن احتمال حدوث هجمات إرهابية في المستقبل، ولكن يبدو أنّ غوركا أعطى أهمّية زائدة للمهارات التنظيمية للإرهابيين.

* * *

يشير منطق «مسألة حفل الميلاد" نفسه إلى أنّه يتعيّن علينا توخّي الحذر في كيفية تفسير أدلّة الحمض النووي التي تؤدّي دوراً كبيراً في عديد من المحاكمات الجنائية الحديثة (كما أوضحنا في الفصل السابق). ففي عام 2001، أثناء تفتيش قاعدة بيانات الحمض النووي لولاية أريزونا المكوّنة من 65,493 عيّنة، اكتشف أحد العلماء وجود تطابق جزئي بين ملفين غير مترابطين[81]. شمل التطابق تسعة من ثلاثة عشر موضعاً بين العيّنتين. في الواقع، بالنسبة إلى شخصين لا تربط بينهما علاقة قرابة، نتوقّع تطابقاً على هذا المستوى مرّة واحدة تقريباً من بين كل 31 مليون عيّنة. دفع هذا الاكتشاف الصادم إلى البحث عن مزيد من حالات التطابق الممكنة. وبحلول الوقت الذي تمّت فيه مقارنة كافّة البصمات الوراثية في قاعدة البيانات، عُثر على 122 زوجاً من البصمات الوراثية التي تعود إلى أفراد لا تجمع بينهم صلة قرابة وتشتمل على تطابق في تسعة مواضع أو أكثر.

استناداً إلى هذه الدراسة[82]، والشكوك التي نتجت عنها في تفرّد معرّفات الحمض النووي، طلب محامون في جميع أنحاء الولايات المتّحدة إجراء مقارنات مماثلة في قواعد بيانات الحمض النووي الأخرى، بما في ذلك قاعدة بيانات الحمض النووي الوطنية التي تحتوي على 11 مليون عيّنة. ففي ظلّ ظهور 122 حالة تطابق في قاعدة بيانات صغيرة لا يزيد عدد عيّناتها عن 65,000 عيّنة، هل يمكن الاعتماد على الحمض النووي فقط لتحديد هوية المشتبه بهم في بلد يبلغ تعداد سكانه 300 مليون نسمة[83]؟ هل الاحتمالات المرتبطة بالبصمات الوراثية غير دقيقة وتؤثّر بالتالي على سلامة الأحكام المستندة إلى تحليل الحمض النووي في أنحاء البلاد؟ هذا ما اعتقده بعض المحامين، لا بل وقدّموا نتائج دراسة أريزونا كدليل من أجل التشكيك في موثوقيّة أدلّة الحمض النووي في محاكمات المتّهمين.

في الواقع، باستخدام صيغة الأعداد المثلّثية، نكتشف أنّ مقارنة كلّ عيّنة من العيّنات الـ 65,493 في قاعدة بيانات أريزونا مع بعضها البعض تعطي ما مجموعه أكثر من مليوني زوج فريد من العيّنات. ومع احتمال وجود تطابق واحد بين كلّ 31 مليون زوج من البصمات الوراثية العائدة إلى أشخاص لا قرابة بينهم، يجب أن نتوقّع 68 تطابقاً جزئيّاً (أي تطابق في تسعة مواضع). ويمكن بسهولة تفسير الفرق بين التطابقات الـ 68 المتوقّعة والـ 122 تطابقاً التي تمّ العثور عليها من خلال البصمات الوراثية للأقارب المقرّبين في قاعدة البيانات. ومن المرجّح إلى حدّ كبير أن تشتمل هذه البصمات الوراثية على تطابق جزئي أكثر من تلك العائدة إلى أفراد غير أقرباء. هكذا، وبدلاً من اهتزاز ثقتنا في أدلّة الحمض النووي، فإنّ نتائج قاعدة البيانات تتّفق تماماً مع الرياضيّات في ضوء صيغة الأعداد المثلّثية.

أرقام مرجعية

في مقال الديلي ستار الأصلي الذي يلفت الانتباه إلى المصادفة في تاريخَي مقتل فوزيلير لي ريغبي وهجوم مانشستر أرينا، يُعتبر الاحتمال الذي نحتاج إلى دراسته من أجل تقييم ادّعاء غوركا مخفيّاً عن الأنظار. ويتناقض ذلك بشكل مباشر مع الطريقة التي يستخدم بها معظم المعلنين الأرقام. فعندما يُعثر على أرقام جذّابة بما فيه الكفاية، يتمّ تقديمها عموماً بطريقة واضحة. إذ يعرف المعلنون أنّ الأرقام تُعتبر على نطاق واسع حقائقَ صحيحة لا يمكن دحضها. ومن شأن إضافة رقم إلى الإعلان أن يكون مقنعاً للغاية ويضفي قوّة على حجّة المروِّج. إذ تمتاز الإحصائيات بموضوعية ظاهرية كما لو أنّها تقول، «لا تثق فقط بما نقول، بل ثق بهذا الدليل الذي لا يقبل الجدل».

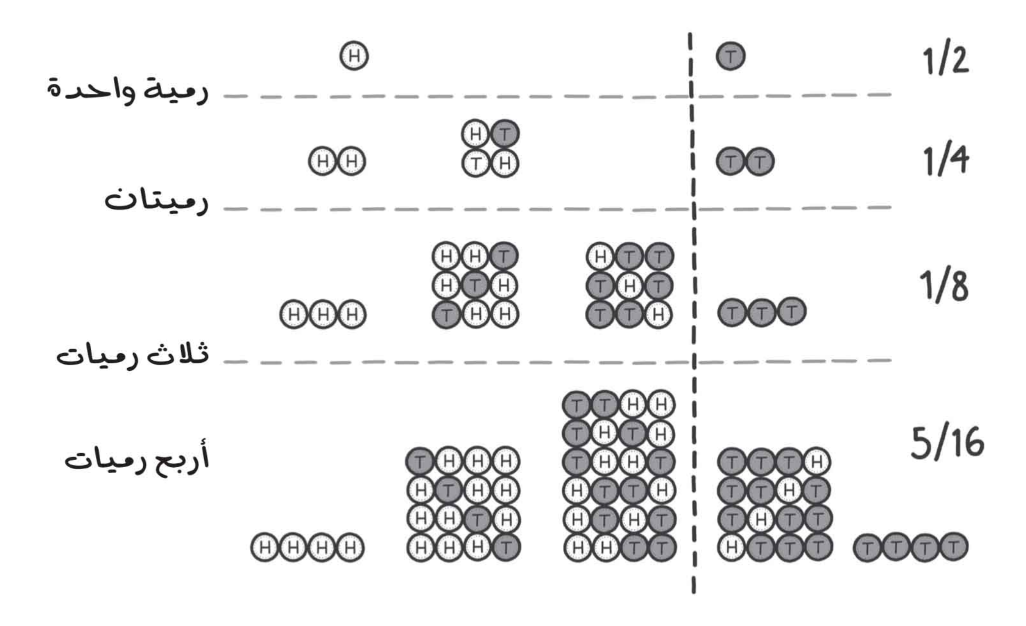
بين عامي 2009 و2013، قامت لوريال بالإعلان عن خطّ مستحضرات مكافحة الشيخوخة، Lancôme Génifique، وبيعه. وإلى جانب العلم الزائف المعتاد الذي يستند إليه الإعلان («الشباب في مورّثاتك، أعيدي تنشيطه»، «والآن، عزّزي نشاط مورّثاتك وحفّزي إنتاج بروتينات الشباب».) كان ثمّة رسم بياني يُظهر، على حدّ زعم الإعلان، أنّه بعد سبعة أيّام فقط من استعمال المستحضر، لاحظت 85% من المستهلكات أنّ بشرتهنّ أصبحت «مشرقة تماماً»، و82% أنّ بشرتهنّ أصبحت «متجانسة على نحو مذهل»، بينما أصبحت بشرة 91% منهنّ «غاية في النعومة»، وسجّلت 82% منهنّ «تحسّناً عامّاً في مظهر البشرة». ولو وضعنا جانباً الوصف الغامض جدّاً لهذا التحسّن، فإنّ هذه الأرقام تبدو مؤثّرة للغاية، وتؤيّد المنتج على نحو ملفت.

غير أنّنا لو أمعنّا النظر في الدراسة الكامنة خلف الأرقام، لوجدنا قصّة مختلفة تماماً. فقد طُلب من النساء المشاركات في الدراسة استعمال Génifique مرّتين في اليوم والإعراب عن رأيهنّ بعبارات من مثل: «بشرة تبدو أكثر إشراقاً»؛ «لون البشرة يبدو أكثر تجانساً»؛ و«البشرة تبدو أكثر نعومة». وطُلب منهنّ تقييم موافقتهنّ على هذه التصريحات على مقياس مكوّن من تسع نقاط، تتراوح درجاته من 1 «لا أوافق إطلاقاً» إلى 9 «أوافق تماماً». ولم يُطلب من المشاركات تقييم درجة إشراق البشرة أو نعومتها أو تجانسها، بل كم يوافقن أو يختلفن على حدوث تحسّن وحسب. وبالتأكيد لم يُطلب منهنّ استعمال عبارات مثل «تماماً» أو «على نحو مذهل».

أظهرت نتائج الاستطلاع أنّه على الرغم من موافقة 82% من النساء (سجّلن ما يتراوح بين ستّة وتسعة على مقياس التسع نقاط) على أنّ بشرتهنّ بدت أكثر تجانساً بعد سبعة أيّام، إلّا أنّ أقلّ من 30% «وافقن تماماً» على ذلك. أيضاً، ومع أنّ 85% وافقن على أنّ بشرتهنّ بدت أكثر إشراقاً، إلّا أنّ 35.5% فقط وافقن على ذلك تماماً. بالتالي، كانت لوريال تتلاعب بنتائج الاستطلاع الذي أجرته لتبدو أكثر إثارة للإعجاب ممّا هي عليه في الواقع.

ربّما كان العامل الأكثر إثارة للقلق هو حجم الدراسة. فبوجود 34 مشاركة فقط، من الصعب التأكّد من موثوقيّة النتائج، بسبب تأثير يُعرف باسم «تقلّبات العيّنات الصغيرة». فعادة ما تُظهر العيّنات الصغيرة انحرافات أكبر عن المتوسّط الحقيقي للسكّان مقارنة بالعيّنات الكبيرة. لتوضيح ذلك، تخيّل أنّني أملك عملة معدنية غير مرجّحة - أي يمكن أن تهبط بنسبة 50% على الطرّة و50% على النقش. لسبب معيّن، أريد إقناع الناس أنّ العملة مرجّحة لصالح النقش. ولنقل إنّهم سيقتنعون إذا أظهرتُ لهم أنّ النقش يظهر بنسبة 75% من المرّات. فكيف تتغيّر فرصي في إقناعهم مع ازدياد حجم العيّنة - أي عدد مرّات رمي العملة؟

قد أحاول إنهاء المسألة بسهولة من خلال رمي العملة مرّة واحدة فقط. إذا حصلت على نقش، فسأكون سعيداً، ذلك أنّ نقشاً واحداً برمية واحدة يتجاوز عتبة 75%. يحدث ذلك في نصف المناسبات التي أرمي فيها العملة مرّة واحدة. إذ تمنحني الرمية الواحدة أفضل فرصة لإقناع شخص ما بأنّ العملة مرجّحة. لكنّهم سيكونون محقّين في رغبتهم برؤية مزيد من البيانات المقنعة، والطلب منّي رمي العملة مرّة أخرى. مع رميتين، أحتاج إلى الحصول على نقشين لإقناع الناس أنّ العملة مرجّحة. فنقش واحد وطرّة واحدة لن يبتّا المسألة لأنّ النقش ظهر بنسبة 50% فقط في هذه الحالة. وكما نرى في الشكل



الشكل 17: المجموعات المحتملة من الطرّة والنقش التي يمكن أن تنشأ مع مختلف أعداد رميات العملة، وصولاً إلى أربع رميات. يفصل الخطّ بين النتائج التي تبلغ فيها نسبة ظهور النقش 75% على الأقلّ عن تلك التي تقلّ فيها هذه النسبة عن ذلك.

17، فإنّ النقشين هما واحدة من النتائج الأربعة المحتملة لرميتين مع عملة غير مرجّحة، وبذلك لا أفوز سوى بربع عدد الأشخاص الذين أحاول إقناعهم. وينخفض احتمال الحصول على نقش في 75% من المرّات على الأقلّ بصورة سريعة مع ازدياد حجم العينة، كما نرى في الشكل 18. هكذا، عندما يُطلب منّي زيادة حجم العينة إلى 100 رمية، فإنّ فرص نجاحي في إقناع شخص ما بأنّ العملة مرجّحة تهبط إلى 0.0000009.

مع ازدياد حجم العيّنة، ينخفض التباين حول المعدّل المتوسّط (في هذه الحالة يكون المعدّل المتوسط 50% نقش)، فتتزايد صعوبة إقناع شخص ما بشيء غير صحيح. لهذا السبب، مع 34

مشارِكة فقط في الدراسة، ينبغي أن نشكّك في مصداقية النتائج المعروضة في إعلان لوريال.


عادة، تقدّم الإعلانات ذات العيّنات الصغيرة نتائجَها بالنسب المئوية



الشكل 18: تتضاءل فرص إقناع شخص ما بأنّ العملة المعدنية السليمة مرجّحة لصالح النقش بسرعة مع ازدياد عدد الرميات.

(82% حصلن على بشرة متجانسة على نحو مذهل) بدلاً من نسبة النتيجة الفعلية إلى العدد الأصلي (28 من 34 حصلن على بشرة متجانسة على نحو مذهل) لإخفاء أحجام العيّنات الصغيرة المحرجة. ولكنّ ما يكشف صغر حجم العيّنة، كما في حالة إعلان Génifique، أن تجد نسبتين متشابهتين (82% أيضاً وجدن تحسّناً في المظهر العام للبشرة). فثمّة خيارات قليلة نسبيّاً للانتقاء من بينها في عيّنة صغيرة الحجم إذا كنت تريد إقناع جمهورك بأنّ منتجك جيّد، ولكنّه ليس جيّداً جدّاً (مثلاً، قد تبدو الأرقام المتراوحة بين 95% و100% مثيرة للشكوك). أمّا مع عينة أكبر حجماً، فمن غير المرجّح أن يعطي عدد الأشخاص نفسه إجابات إيجابية على سؤالين مختلفين.

في عام 2014، كتبت لجنة التجارة الفيدرالية (FTC) إلى لوريال متّهمة إيّاها بترويج إعلانات خدّاعة لمجموعة Génifique [84]. وادّعت اللجنة أنّ أرقام مخطّطات الإعلانات «غير صحيحة أو مضلّلة» ولا تثبتها الدراسات العلمية. ردّاً على ذلك، أُجبرت لوريال على الموافقة على التوقّف عن «تقديم ادّعاءات بشأن هذه المنتجات على نحو يشوّه نتائج أيّ اختبار أو دراسة».

بالإضافة إلى التحيّز الناتج عن العيّنة الصغيرة، من المحتمل أن تكون دراسة Génifique قد اشتملت أيضاً على تحيّزات تتعلّق بطريقة أخذ العيّنات مثل «تحيّز الاستجابة الطوعية» أو

«تحيّز الاختيار». فإذا كانت لوريال قد جنّدت المشارِكات في الدراسة من خلال وضع إعلان على موقعهنّ على الإنترنت، على سبيل المثال، فمن المحتمل أن تكون قد اختارت نساء سريعات التأثّر أساساً بالفوائد المتوقّعة للمنتج وميّالات إلى إعطائه تقييماً جيّداً (تحيّز الاستجابة الطوعية). أو ربّما عمد القيّمون على الدراسة بدلاً من ذلك إلى اختيار النساء بأنفسهم لأنّهنّ أعطين تقييمات جيّدة لمنتجات لوريال في الماضي (تحيّز الاختيار).

ثمّة طرق أخرى أكثر إثارة للشكوك يمكن فيها التوصّل إلى الأرقام المفضّلة من أجل دراسة، أو استطلاع، أو مقطع سياسي مسجّل. فإذا لم تعد الدراسة الأولى التي شملت 34 مشاركة بنتيجة إيجابية، فلماذا لا نجري دراسة أخرى؟ عاجلاً أم آجلاً، سيعطيك التباين الكبير ردود الفعل الرائعة التي تحتاج إليها. بالإمكان أيضاً إجراء تجربة على نطاق أوسع، واختيار المشاركات اللواتي يقدّمن أفضل الإجابات. يُعرف ذلك بالتلاعب بالبيانات. مثال شائع عن هذه الظاهرة هو التقرير المتحيّز. فالعلماء الذين يحقّقون في الظواهر العلمية الزائفة مثل الطبّ البديل أو الإدراك الخارج عن الحواسّ (القدرات النفسية) غالباً ما يعربون عن استيائهم ممّا يعتبرونه تقارير متحيّزة بين الباحثين المتعاطفين مع القضيّة. إذ يقوم الباحثون عديمو الأخلاق بتقديم «النتائج الإيجابية» فقط (يختارون المشاركين الذين يبلغون أنّهم استفادوا من العلاج مثلاً، أو يجرون اختباراً «نفسانياً» لاختيار اللون المناسب للبطاقة التالية في مجموعة مختلطة من البطاقات)، بينما يتمّ إهمال غالبيّة «النتائج السلبية»، بحيث تبدو النتائج مؤاتية أكثر ممّا هي في الواقع. وعندما يتّحد نوعان أو أكثر من التحيّزات، يمكن أن يعطيا نتائج مختلفة بشكل كبير عن تلك المتوقّعة في عيّنة غير متحيّزة، كما اكتشف محرّرو مجلّة *ليتريري دايجست*.

أساليب خاطئة

في الفترة التي سبقت انتخابات عام 1936 لاختيار الرئيس الثاني والثلاثين للولايات المتّحدة، أخذ محرّرو المجلّة الشهرية التي تحظى باحترام كبير، *ليتريري دايجست*، على عاتقهم إجراء استطلاع للتنبّؤ بالفائز. وكان المرشّحون الرئيس الحاكم، فرانكلين د. روزفلت، ومنافسه الجمهوري آلف لاندون. كانت المجلّة فخورة بتاريخها بالإصابة في توقّع الرئيس المقبل، منذ عام 1916. فقبل أربع سنوات، في عام 1932، توقّعت المجلّة هامش فوز روزفلت ضمن نقطة مئوية[85]. في عام 1936، كان من المفترض أن يكون استطلاعهم طموحاً ومكلفاً مثل أيّ استطلاع أجروه من قبل. فأنشأت دايجست قائمة تضمّ نحو 10 ملايين اسم (نحو ربع المقترعين) بناءً على

سجلّات تسجيل السيارات والأسماء الواردة في أدلّة الهاتف. وفي أغسطس، أرسلوا استطلاعات للرأي إلى كلّ شخص قاموا بتعيينه، وأعلنوا في المجلة[86]: «... إذا كانت التجربة السابقة معياراً، فسوف تعرف البلاد حتّى حدود جزء من واحد بالمائة التصويت الشعبي الفعلي لأربعين مليوناً [من الناخبين]».

بحلول 31 أكتوبر، كان قد تمّ إرجاع أكثر من 2.4 مليون صوت وعدّها[87]. وكانت دايجست جاهزة للإعلان عن نتائجها. حمل المقال العنوان التالي[88]: «لاندون، 1,293,669؛ روزفلت، 972,879». بحسب دايجست، كان لاندون فائزاً بهامش واسع: 55% إلى 41% من التصويت الشعبي (مع مرشّح ثالث، ويليام ليمكي، حصل على 4%) لنيله 370 من أصل 531 صوتاً انتخابياً. وبعد أربعة أيّام فقط، عندما تمّ الإعلان عن نتائج الانتخابات الحقيقية، صُعق رؤساء تحرير مجلّة دايجست بإعادة روزفلت رئيساً للبيت الأبيض. ولم يكن الفوز بهامش ضيّق أيضاً، بل كان ساحقاً. فاز روزفلت بنسبة 60.8% في التصويت الشعبي - وهي أكبر حصّة منذ عام 1820. فقد حصل على 523 صوتاً انتخابياً، مقابل ثمانية للاندون. هكذا أخطأ مؤشّر *دايجست* بنحو 20 نقطة مئوية في توقّعه للتصويت الشعبي. قد نتوقّع تبايناً كبيراً في النتائج مع عيّنة صغيرة الحجم، لكنّ استطلاع *ليتريري دايجست* شمل 2.4 مليون شخص. فكيف وقع الخطأ مع عيّنة كبيرة كهذه؟

يكمن الجواب في التحيّز في أخذ العيّنة. إذ كانت المشكلة الأولى في استطلاع الرأي هي تحيّز الاختيار. ففي عام 1936، كانت أميركا لا تزال في تعاني من آثار الكساد العظيم. ومن المحتمل أن يكون الأشخاص الذين يملكون سيّارات وهواتف هم من بين الميسورين مادّياً في المجتمع. بالتالي، كانت القائمة التي جمعتها *دايجست* مائلة نحو كفّة ناخبي الطبقة العليا والمتوسّطة، الذين كانت آراؤهم السياسية يمينية النزعة، وكان دعمهم لروزفلت أقلّ قوّة. بالمقابل، استثنى الاستطلاع تماماً العديد من الفقراء الذين كانوا يشكّلون الدعم الأساسي لروزفلت.

ربّما كان الأهمّ بالنسبة إلى نتائج الاستطلاع ظاهرة معروفة بتحيّز عدم الإجابة. فمن بين عشرة ملايين اسم في القائمة الأصلية، أجاب أقلّ من الربع. وبالنتيجة، لم يأخذ المسح العيّنات من مجموعة السكّان التي قصدها في الأساس. وحتّى لو كان القطاع الديموغرافي الأوّلي الذي تمّ اختياره يمثّل السكّان ككلّ (لكنّه لم يكن كذلك)، فإنّ الأشخاص الذين أجابوا على استطلاع الرأي كانوا يميلون إلى اتّخاذ مواقف سياسية مختلفة عن أولئك الذين لم يفعلوا. وكان الأشخاص الأكثر ثراءً والأفضل تعليماً الذين أجابوا عموماً من مؤيّدي لاندون، وليس روزفلت. هكذا تضافر هذان التحيّزان في أخذ العيّنات لإعطاء نتائج غير صحيحة إلى حدّ محرج، وجعلا من *دايجست* أضحوكة.

في العام نفسه، استخدمت مجلّة فورتشن 4500 [89] مشارك فقط، وتمكّنت من توقّع هامش فوز روزفلت بفارق لا يتعدّى 1%. فكانت المقارنة بنتائج ليتريري دايجست غير واردة. ويُشار إلى أنّ الضربة التي تلقّتها مصداقيّة المجلّة بسبب تلك النتائج كانت عاملاً مهمّاً في تسريع إغلاقها بعد أقلّ من عامين[90].

احسبها

في حين وجد المستطلعون السياسيون أنّ عليهم أن يكونوا أكثر دراية من الناحية الإحصائية من أجل تحقيق نتائج دقيقة، يجد السياسيون أنفسُهم أنّ بإمكانهم الإفلات مع مزيد من التلاعب الإحصائي والاختلاس والإهمال أكثر من أيّ وقت مضى. فعندما ترشّح دونالد ترامب لرئاسة الجمهورية في نوفمبر 2015، نشر تغريدة بالإحصائيّات التالية:

«السود الذين قُتلوا على أيدي البيض 2%

السود الذين قُتلوا على أيدي رجال الشرطة 1%

البيض الذين قُتلوا على أيدي رجال الشرطة 3%

البيض الذين قُتلوا على أيدي البيض 16%

البيض الذين قُتلوا على أيدي السود 81%

السود الذين قُتلوا على أيدي السود 97%».

نُسبت الأرقام إلى «مكتب إحصائيّات الجريمة - سان فرانسيسكو». لكن تبيّن أنّ هذا المكتب لا وجود له، والإحصائيّات خاطئة إلى حدّ بعيد. وفي ما يلي بعض الإحصائيّات المقارَنة الحقيقية لعام 2015 (مع الأرقام الأوّلية الواردة في الجدول 10) من مكتب التحقيقات الفيدرالي:

«السود الذين قُتلوا على أيدي البيض 9%

البيض الذين قُتلوا على أيدي البيض 81%

البيض الذين قُتلوا على أيدي السود 16%

السود الذين قُتلوا على أيدي السود 89%».

من الواضح أنّ تغريدة ترامب بالغت في تقدير عدد جرائم القتل التي ارتكبها السود، وبدّلت فعليّاً أرقام جرائم القتل التي ارتكبها «البيض ضدّ البيض» و«السود ضدّ البيض». مع ذلك، أعيد تغريدها أكثر من 7000 مرّة، ونالت أكثر من 9000 إعجاباً. وهذا مثال كلاسيكي على تحيّز التأكيد. فقد أعاد الناس تغريد هذه الرسالة الخاطئة لأنّها جاءت من مصدر يحترمونه ويتناغم مع تحيّزاتهم الموجودة مسبقاً. ولم يتوقّفوا للتأكّد من صحّتها، شأنهم شأن ترامب. فعندما سأله الصحفي بيل أورايلي على قناة فوكس نيوز حول دوافعه لنشر تلك التغريدة، وبعد ادّعائه أوّلاً، بأسلوب قطعي نموذجي، «قد أكون الإنسان الأقلّ عنصريّة على وجه الأرض»، تابع مضيفاً، «... هل سأتحقّق من كلّ الإحصائيّات؟».

* * *

جاءت تغريدة ترامب في عام 2015، في ذروة النقاش الوطني حول وحشية الشرطة، لا سيّما تلك التي تستهدف الضحايا السود. فمثل هذه الحالات، بما فيها على وجه الخصوص وفاة المراهقَين الأسودين غير المسلّحين ترايفون مارتن ومايكل براون، كانت الحافز لتشكيل حركة «Black Lives Matter» (حياة السود مهمّة) وتوسّعها السريع. فبين عامي 2014 و2016، نظمّت الحركة احتجاجات جماهيرية، بما في ذلك مسيرات واعتصامات في جميع أنحاء الولايات المتّحدة. وبحلول سبتمبر 2016، باتت لها فروع في المملكة المتّحدة وأثارت احتجاجاتها غضب الصحفي اليميني رود ليدل. وقد لفت انتباهي منشور في مدوّنة إلكترونية[91] ذات توجّه رياضي إلى تعليقات ليدل في صحيفة التابلويد البريطانية، *The Sun*، حول أساس الحركة الأصليّة في الولايات المتّحدة:

تمّ تأسيسها للاحتجاج على قيام رجال شرطة أميركيين بإطلاق النار على المشتبه بهم السود بدلاً من مجرّد القبض عليهم.

لا شكّ أنّ رجال الشرطة في الولايات المتّحدة سعداء قليلاً، لا سيّما ربّما عندما يظهر مشتبه به أسود.

ما من شكّ أيضاً في أنّ الخطر الأكبر الذي يتهدّد السود في الولايات المتّحدة يتمثّل... في السود الآخرين.

يبلغ متوسّط عدد جرائم القتل المرتكبة من السود ضدّ السود أكثر من 4000 جريمة سنوياً. ويبلغ عدد الرجال السود الذين يُقتلون على أيدي رجال شرطة أميركيين - عن حقّ أو غير حقّ - أكثر بقليل من 100 شخص سنوياً.

احسبوها.

وها أنا قد حسبتها.

دعونا ننظر في إحصائيّات عام 2015، وهي آخر سنة تقويمية كاملة كان بإمكان ليدل أن يصل فيها إلى البيانات. وفقاً لإحصائيّات مكتب التحقيقات الفيدرالي إف بي آي[92] المُلخّصة في الجدول 10، قُتل 3167 شخصاً أبيض و2664 شخصاً أسود في العام 2015. ومن بين جرائم القتل التي وقع ضحيّتها البيض، تمّ ارتكاب 2574 جريمة (81.3%) من قبل جناة بيض و500 جريمة (15.8%) من قبل جناة سود[93]. أمّا من بين جرائم القتل التي وقع ضحيّتها السود، فقد تمّ ارتكاب 229 جريمة (8.6%) من قبل جناة بيض و2380 جريمة (89.3%) من قبل جناة سود[94]. بالتالي فإنّ ادّعاء ليدل بوقوع 4000 جريمة قتل سنوياً على أيدي السود ضدّ السود هو رقم مبالغ فيه كثيراً، بنسبة 70% تقريباً. وبالنظر إلى أنّ السود كانوا يشكّلون 12.6% فقط من سكّان الولايات المتّحدة في عام 2015، والبيض 73.6%، فإنّه من المثير للقلق أن يشكّل السود 45.6% من ضحايا جرائم القتل[95].

الأصل العرقي للضحية	المجموع	الأصل العرقي للجاني	
		أبيض	أسود
أبيض	3167	(81.3%) 2574	(15.8%) 500
أسود	2664	(8.6%) 229	(89.3%) 2380

الجدول 10: إحصائيّات جرائم القتل لعام 2015 موزّعة حسب الأصل العرقي للضحيّة والجاني[96]. يرجع التباين بين عمود المجموع ومجموع عمودَي الضحايا البيض والسود إلى الحالات التي يكون فيها الأصل العرقي للضحيّة مختلفاً أو مجهولاً.

على الرغم من أنّ هذه المسألة شكّلت محور نقاش هامّ، إلّا أنّه من الأصعب الحصول على أرقام عن عدد الأشخاص الذين قُتلوا على أيدي رجال الشرطة. إذ شكّل إطلاق النار الذي أودى بحياة المراهق الأسود مايكل براون على يد ضابط الشرطة الأبيض دارِن ويلسون، والاحتجاجات اللاحقة التي اندلعت في فيرغسون بولاية ميسوري، نقطة تحوّل لحركة «حياة السود مهمّة». وساهمت الاحتجاجات أيضاً في تسليط الضوء على بيانات الإف بي آي عن «عدد جرائم القتل التي تنفّذها الشرطة سنويّاً». إذ تبيّن أنّ مكتب التحقيقات الفيدرالي يسجل أقلّ من نصف عمليّات القتل التي تقع على أيدي رجال الشرطة في الولايات المتّحدة. نتيجة لذلك، بدأت *الغارديان* في عام 2014 حملتها، «المعدودون The Counted»، لجمع أرقام أكثر دقّة[97]. كان المشروع ناجحاً جدّاً إلى حدّ أنّه في أكتوبر 2015، رأى مدير مكتب التحقيقات الفيدرالي آنذاك، جيمس كومي، أنّه «من المحرج والمثير للسخرية» أن تتوفّر لدى *الغارديان* بيانات عن وفيات المدنيين على أيدي الشرطة أفضل من بيانات الإف بي آي[98].

تشير أرقام *الغارديان* إلى أنّه من بين 1146 شخصاً قتلوا «عن صواب أو عن خطأ» (على حدّ تعبير ليدل) على يد الشرطة في عام 2015، كان 307 (26.8%) منهم من السود و584 (51.0%) من البيض[99] (في حين أنّ باقي الضحايا كانوا من أعراق مختلفة أو غير محدّدة). مجدّداً، كانت أرقام ليدل غير دقيقة على الإطلاق. فادّعاؤه بسقوط 100 ضحيّة من المواطنين السود على أيدي رجال الشرطة سنويّاً هو أقلّ من ثلث العدد الحقيقي.

إذا كان ليدل يحاول الإجابة على السؤال «إذا قُتل شخص أسود في الولايات المتّحدة، فهل من الأكثر احتمالاً أن يكون القاتل أسود آخر أم ضابط شرطة؟»، فإنّه باستخدام الأرقام الصحيحة، يتبيّن بوضوح أنّ السود يقتلون عدداً من السود يفوق ثماني مرّات تقريباً (2380 مقابل 307) العدد الذي يسقط على أيدي رجال الشرطة. لكنّ هذا السؤال يبدو مضلِّلاً. مثلاً، هل ستَعتبر الكلاب أكثر دموية من الدببة إذا قلت لك أنّه في عام 2019، قتلت الكلاب 40 مواطناً أميركياً بينما قتلت الدببة اثنين فقط؟ بالطبع لا. فالكلاب بطبيعتها ليست أكثر خطورة من الدببة، لكنّ عددها في الولايات المتّحدة أكبر ببساطة. بعبارة أخرى، إذا اضطررتَ للبقاء بمفردك في غرفة مع دبّ أو كلب، فأيّهما تفضّل؟ بالنسبة إليّ، سأختار الكلب حتماً.

للسبب نفسه، ونظراً لوجود أكثر من 40.2 مليون مواطن أميركي أسود[100] و635,781 فقط من «ضبّاط إنفاذ القانون» بدوام كامل (ممّن يحملون سلاحاً نارياً وشارة)[101]، فليس من المستغرب أن يكون عدد القتلى الذين يسقطون على أيدي السود أكبر من عدد أولئك الذين يسقطون على أيدي ضبّاط إنفاذ القانون. وربّما كان من الأنسب أن يطرح ليدل السؤال التالي: «إذا صادف مواطن أميركي أسود شخصاً يمشي بمفرده، فمن الذي يشكّل عليه خطراً أكبر: مواطن أسود آخر أم ضابط إنفاذ القانون؟».

لمعرفة الإجابة، نحتاج إلى مقارنة معدّلات «نصيب الفرد» من عمليّات القتل ضدّ السود التي يرتكبها السود وضبّاط الشرطة. ويمكن الحصول على معدّلات نصيب الفرد، كما هو موضح في الجدول 11، بقسمة العدد الإجمالي للضحايا السود الذين قتلوا على أيدي مجموعة معيّنة (السود أو ضبّاط الشرطة) على حجم المجموعة. كان السود مسؤولين عن مقتل 2380 ضحية سوداء أخرى في عام 2015، لكن بوجود أكثر من 40.2 مليون مواطن أميركي أسود، يصبح معدّل نصيب الفرد صغيراً نسبيّاً - نحو 1 من كلّ 17,000. بالمقابل، كان رجال الشرطة مسؤولين «عن صواب أو عن خطأ» عن مقتل 307 شخصاً أسود في عام 2015. لكن بوجود 635,781 رجل شرطة، فإنّ معدّل نصيب الفرد يقلّ قليلاً عن ضحيّة واحدة لكلّ 2000 ضابط شرطة - أي ما يزيد عن ثمانية أضعاف معدّل المواطنين الأميركيين السود. يبدو بالتالي أنّ المواطن الأسود الذي يسير في الشارع يجب أن يكون أكثر قلقاً لدى رؤية ضابط شرطة منه لو رأى مواطناً أسود آخر.

القاتل	عدد القتلى السود	عدد الأفراد	معدّل نصيب الفرد من عمليّات القتل
مواطنون سود	2380	40,241,818	1/ 16908
ضباط إنفاذ القانون	307	635,781	1/ 2071

الجدول 11: عدد عمليّات القتل التي وقع ضحيّتها مواطن أسود، مصنّفة حسبما إذا كان القتل قد ارتُكب من قبل مواطن أسود آخر أو رجل شرطة. كما تمّ ذكر عدد أفراد المجموعتين واستُخدم لتحديد معدّل نصيب الفرد من عمليّات القتل.

بالطبع نحن لم نأخذ بعين الاعتبار حقيقة أنّ المواجهات مع الشرطة غالباً ما تكون عنيفة وأنّ الشرطة الأميركية تكون مسلّحة عادة. وربّما ليس من المستغرب أن يقوم المخوّلون باستخدام القوّة المميتة بممارستها أكثر من عامّة السكان عموماً. واستناداً إلى الحسابات نفسها، يمكننا أن نظهر أنّ البيض يجب أن يكونوا هم أيضاً أكثر خوفاً من ضبّاط إنفاذ القانون (يبلغ معدّل نصيب

الفرد من الضحايا البيض واحداً لكلّ 1000 ضابط) منهم من البيض الآخرين (يبلغ معدّل نصيب الفرد من الضحايا البيض واحداً لكلّ 90,000 شخص أبيض)، على الرغم من أنّ عدد البيض الذين يقتلون بيضاً آخرين يفوق عدد رجال الشرطة الذين يقتلون بِيضاً. وحقيقة أنّ معدّل نصيب الفرد من الضحايا البيض لدى ضبّاط الشرطة يعادل ضعف هذا المعدّل من الضحايا السود ترجع إلى وجود عدد أكبر من المواطنين البيض في البلاد. لكن هنا أيضاً، قد يكون من المقلق أن يبلغ المعدّل الضعف فقط، بالنظر إلى كون عدد المواطنين البيض يقارب ستّة أضعاف عدد السود في الولايات المتّحدة.

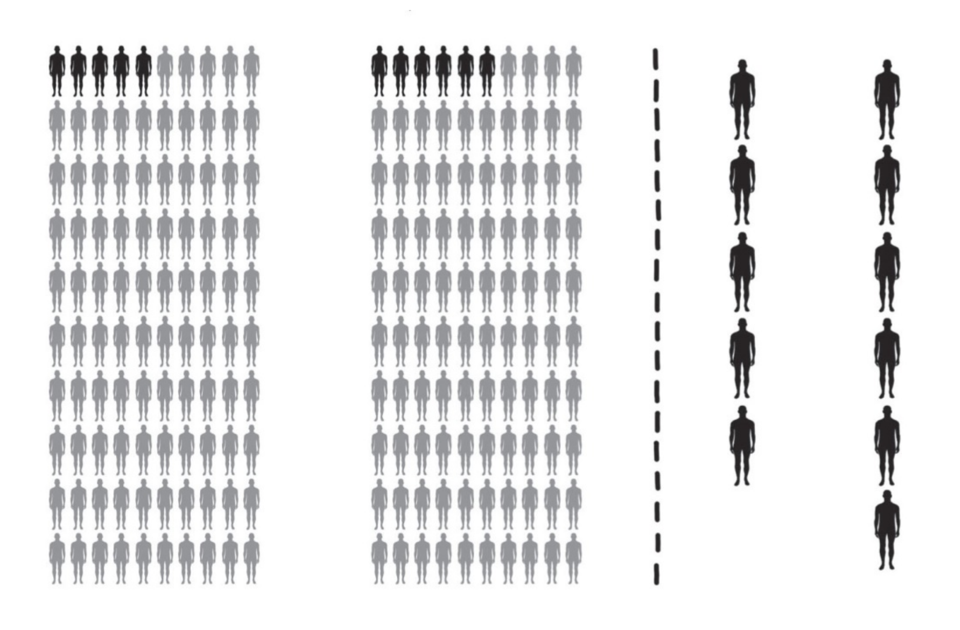
إذاً، في حين أنّ إحصائيّات ليدل خاطئة وحجّته مضلّلة، ربّما كان الأهمّ أنّه من خلال السؤال «من يَقتل أكثر من غيره» بدلاً من «من يُقتل أكثر من غيره»، فإنّ مقالته في مجلّة صن تحوّل الانتباه عن إحصائيّات تقع في أساس حركة حياة السود مهمّة: أنّ نسبة السود البالغة 12.6% تمثّل 26.8% من ضحايا عمليّات القتل على أيدي رجال الشرطة، في حين أنّ نسبة البيض البالغة 73.6% تمثّل 51.0% فقط. فهل ثمّة روابط خفية (أي «متغيّرات كامنة» من تلك التي صادفناها في الفصل السابق، لإيضاح الفوائد المفترضة للتدخين عند الأطفال ذوي الوزن المنخفض عند الولادة) قد تفسّر هذا التباين؟ هذا مؤكّد. على سبيل المثال، الأشخاص الأكثر فقراً هم أكثر ميلاً إلى ارتكاب الجرائم، وفي الولايات المتّحدة، يعتبر السود أكثر فقراً من غيرهم. ولم يتبيّن لنا بعد ما إذا كان لهذه العوامل دور في الزيادة المفرطة في عدد السود في أرقام عمليّات القتل التي ترتكبها الشرطة.

الاستهتار في تناول لحم الخنزير يكلّف الأرواح

لم تكن مقالة ليدل أوّل أو آخر مرّة تتورّط فيها صحيفة صن في جدل إحصائي. ففي عام 2009، وتحت عنوان «الاستهتار في تناول لحم الخنزير يكلّف الأرواح»، أوردت الصحيفة واحدة من بين مئات من النتائج التي توصّلت إليها دراسة من 500 صفحة أجراها الصندوق العالمي لأبحاث السرطان، حول تأثير استهلاك 50 غراماً من اللحوم المصنّعة في اليوم[102]. وصدمت صحيفة التابلويد قرّاءها بحقيقة أنّ تناول شطيرة من لحم الخنزير المقدّد يوميّاً يرفع خطر الإصابة بسرطان القولون والمستقيم بنسبة 20%.

لكنّ الرقم كان ملفتاً. فعند التعبير عن ذلك من حيث «المخاطر المطلقة» - أي نسبة الأشخاص المعرّضين أو غير المعرّضين لعامل خطر معيّن (مثل تناول شطائر لحم الخنزير المقدّد أو عدم تناولها) الذين يتوقّع منهم تطوير نتيجة معيّنة (مثل السرطان) في كلّ حالة - تبيّن أنّ 50غ من اللحوم المصنّعة يوميّاً ترفع خطر الإصابة بسرطان القولون والمستقيم خلال الحياة من 5% إلى 6%. على يسار الشكل 19، ندرس مصائر مجموعتين من 100 فرد. ومن بين 100 شخص يتناولون شطيرة لحم خنزير مقدّد يوميّاً، لا يصاب سوى واحد إضافي منهم بسرطان القولون والمستقيم مقارنة بمجموعة من 100 شخص يمتنعون عن تناول هذه الشطيرة.

بدلاً من استخدام الخطر المطلق الأكثر موضوعية، اختارت مجلّة صن التركيز على «الخطر النسبي» - أي خطر حدوث نتيجة معيّنة (مثل الإصابة بالسرطان) على أشخاص معرّضين لعامل خطر معيّن (مثل تناول شطائر لحم الخنزير المقدّد) كنسبة خطر للسكّان عموماً. إذا كان الخطر النسبي أعلى من 1، فإنّ الشخص المعرّض يصبح أكثر ميلاً للإصابة بالمرض عند مقارنته بشخص غير معرّض له. أمّا إذا كان الخطر النسبي أقلّ من 1، فإنّ الخطر ينخفض. إلى يمين الشكل 19، وبتجاهل الأشخاص غير المصابين بالمرض، يبدو ارتفاع الخطر النسبي (6/ 5 أو ما يعادل 1.2) أكثر بروزاً. صحيح أنّ الخطر النسبي لأولئك الذين يتناولون 50غ من اللحوم المصنّعة يوميّاً يمثّل زيادة بنسبة 20%، إلّا أنّ الخطر المطلق لن يرتفع سوى 1%. لكنّ ارتفاع الخطر بنسبة 1% لا يُسهم في بيع كثير من نسخ الصحيفة. بالمقابل، كان عنوان المقالة مؤثّراً بما فيه الكفاية لإطلاق العاصفة الإعلامية «Save our Bacon». وخلال الأيّام القليلة التالية، أدّى الغضب حيال هذا الرقم إلى وصف العلماء أنّهم «نازيون صحّيون» أعلنوا «الحرب على لحم الخنزير المقدّد».



الشكل 19: تُظهر مقارنة الأرقام المطلقة (5 بالـ 100 مقابل 6 بالـ 100) (إلى اليسار) أنّ ارتفاع الخطر الناجم عن تناول 50غ من اللحوم المصنّعة يوميّاً ضئيل. لكن عند التركيز على العدد الصغير نسبيّاً من الأشخاص الذين يعانون من المرض (إلى اليمين)، يبدو ارتفاع الخطر النسبي البالغ 20% (1 من 5) كبيراً جدّاً.

* * *

ثمّة خدعة إعلامية أخرى لافتة تقوم على التغيير المتعمّد لما نعتبره ونقبله على أنّه عدد السكّان «الطبيعي». تتمثّل الطريقة الأكثر صدقاً لتحديد الخطر النسبي في عرض الخطر المرتفع أو المنخفض بالنسبة إلى مجموعة فرعية معيّنة مقارنةً بالخطر الخلفي لدى عامّة السكّان. في بعض الأحيان، يتمّ استخدام مستويات خطر المرض لدى التجمّع السكّاني الأكبر كخطّ أساس والإبلاغ عن أيّ انحرافات في الخطر بالنسبة إلى إليهم. وعندما يكون المرض نادر الحدوث، تؤلّف المجموعة السليمة جميع السكّان تقريباً على أيّ حال، وبالتالي فإنّ خطر الإصابة لدى التجمّعات السكّانية السليمة يعدّ تقديراً تقريبياً جيّداً لخطر الإصابة لدى عامّة السكّان. فلنأخذ مثالاً على ذلك الإبلاغ عن خطر الإصابة بسرطان الثدي لدى النساء ذوات الطفرة الجينية BRCA1 أو BRCA2. إذ يبدو من المنطقي الحديث عن زيادة الخطر المطلق لدى 0.2% من النساء المصابات بهاتين الطفرتين نسبة إلى عامّة السكّان بدلاً من الحديث عن انخفاض الخطر لدى 99.8% من النساء الخاليات من هاتين الطفرتين. لكن مع الأسف، لا يصنع هذا النوع من التقارير الشفافة الصريحة دائماً أفضل العناوين الصحفية، ولذلك نرى العديد من المنافذ الإخبارية الكبرى تتلاعب بطريقة تقديم الإحصائيّات مراراً وتكراراً من أجل بيع الأخبار.

في قصّة إخبارية نُشرت في عام 2009 تحت عنوان «تسعة من كلّ 10 أشخاص يحملون مورّثة تزيد من احتمال ارتفاع ضغط الدم»، نشرت صحيفة ديلي تلغراف قصّة تتضمّن الجملة التالية: «اكتشف العلماء متغيّر وراثي متواجد لدى نحو 90 بالمائة من السكّان يزيد من احتمال ارتفاع ضغط الدم بنسبة 18 في المائة». وتشير الأرقام المنشورة فعليّاً في مجلّة *نيتشور جينيتيكس* إلى أنّ 10% من الأفراد يملكون متغيّرات وراثية تجعلهم عرضةً لخطر أقلّ بنسبة 15% من 90% من السكّان الذين يملكون متغيّراً مختلفاً[103]. ولم تظهر نسبة 18% في مقالة المجلّة. مع أنّ هذا صحيح من الناحية الفنّية، إلّا أنّ قصّة *ديلي تلغراف* غيّرت بخبث المجموعة المرجعية من السكّان إلى المجموعة الأصغر - 10% من الأشخاص الأقلّ عرضة للخطر. فبما أنّ الانخفاض بنسبة 15% عن القيمة المرجعية 1 يفضي إلى 0.85، اعترف كاتب المقالة أنّ الزيادة المطلوبة للعودة إلى القيمة 1 تبلغ نحو 18% من هذا الرقم الأصغر. وبحركة حسابية سريعة، لم تعمد *ديلي تلغراف*

إلى زيادة حجم الخطر النسبي فحسب، بل تمكّنت أيضاً من تحويل خبر سارّ بالنسبة إلى 10% من السكّان إلى خبر سيّئ بالنسبة إلى 90% من السكّان. وليست *ديلي تلغراف* مثالاً فريداً من نوعه في التلاعب بالأرقام، إذ قامت العديد من الصحف الأخرى بطرح القصّة بالطريقة المشبوهة نفسها لجذب جمهورها.

في كثير من الأحيان، بعد قراءة مقالة مثيرة للاهتمام، يكتشف القارئ أنّه لم يطّلع على المخاطر المطلقة - وذلك عادة من خلال رقمين صغيرين (لا يتجاوزان مطلقاً 100%)، أحدهما لأولئك الخاضعين للحالة أو التدخّل المحوري والآخر لبقيّة السكّان. وفي مناسبات أخرى، قد تدّعي المقالة ارتفاع أو انخفاض الخطر لدى أكثر من نصف السكّان. في هذه الحالات، على القارئ أن يفكّر جيّداً في ما إذا كان يريد قبول حجّة المقالة. فإذا رغبتم في معرفة الحقيقة وراء العناوين الرئيسة، فكّروا في متابعتها في منشور يتيح لكم الوصول إلى الإحصائيّات المطلقة، أو حتّى في المقالة العلمية الأصلية نفسها، والتي بات من الممكن الوصول إليها على نحو متزايد عبر الإنترنت مجّاناً.

إطار عقلي مختلف

لا تقتصر التقارير المشكوك فيها عن المخاطر والاحتمالات على الصحف وحدها. ففي مجال الطبّ، عند الإبلاغ عن مخاطر العلاجات أو عن فاعلية الأدوية وآثارها الجانبية، ثمّة مزيد من الألعاب الإحصائية التي يمكن أن تمارَس من أجل الدفع بأجندة معيّنة. وتتضمّن إحدى الطرق البسيطة لاقتراح تفسير معيّن تأطير الأرقام في ضوء إيجابي أو سلبي. ففي دراسة أجريت في عام 2010، عُرض على المشاركين عدد من البيانات العددية حول إجراءات طبّية وطُلب منهم تصنيف المخاطر المرتبطة بكلّ منها على مقياس من واحد (لا يشتمل على أيّ خطورة) إلى أربعة (شديد الخطورة)[104]. وكان من بينها عبارات مثل: «يحتاج السيّد رو إلى عملية جراحية: 9 من بين كلّ 1000 من الناس يموتون إثر هذه الجراحة»، و«يحتاج السيّد سميث إلى عملية جراحية: 991 من كلّ 1000 شخص ينجون من هذه الجراحة». خذوا ثانية للتفكير مكان من تفضّلون أن تكونوا: السيّد رو أم السيّد سميث؟

بالطبع، يعبّر السؤالان عن الإحصائيّة نفسها بطريقتين متناقضتين - تستخدم الأولى معدّل الوفيات، بينما تستخدم الثانية معدّل النجاة. لكن بالنسبة إلى المشاركين ذوي المهارات الحسابية

المتدنّية، بدا التصريح ذو الإطار الإيجابي أقلّ خطورة بنقطة كاملة على مقياس النقاط الأربعة. وحتّى بالنسبة إلى ذوي المهارات الحسابية الأعلى، فقد بدا الخطر المرتبط بالتصريح ذي الإطار السلبي أعلى.

عند فحص نتائج التجارب الطبّية، ليس مستغرباً رؤية النتائج الإيجابية تُعرض من الناحية النسبية من أجل تحقيق أقصى استفادة ممكنة منها، في حين تُعرض الآثار الجانبية بالقيمة المطلقة في محاولة للحدّ من بروز مخاطرها. تُعرف هذه الممارسة باسم «التأطير غير المتطابق»، وقد لوحظ أنّها تُستعمل في نحو ثلث المقالات التي تتناول أضرار وفوائد العلاج الطبّي في ثلاث من المجلّات الطبّية الرائدة في العالم[105].

لعلّ الأمر الأكثر مدعاة للقلق انتشار هذه الظاهرة في أدبيّات نصائح المرضى. ففي أواخر تسعينيات القرن الماضي، ابتكر المعهد الوطني للسرطان بالولايات المتّحدة الأميركية (NCI) «أداة خطر الإصابة بسرطان الثدي» من أجل تثقيف وتوعية الناس تجاه مخاطر هذا المرض. وإلى جانب العديد من الدراسات الأخرى، نقل هذا التطبيق المستخدم عبر الإنترنت نتائج تجربة سريرية حديثة، أجريت على أكثر من 13,000 امرأة معرّضة لخطر مرتفع للإصابة بسرطان الثدي، وفيها تمّ تقييم الفوائد والآثار الجانبية المحتملة لعقار تاموكسيفين[106]. في التجربة، تمّ تقسيم النساء إلى مجموعتين، متساويتين تقريباً، (عُرفتا باسم «فرعَي» التجربة). أعطيت النساء في الفرع الأوّل عقار تاموكسيفين، بينما أُعطين في الفرع الثاني علاجاً وهمياً كعنصر تحكّم.

في نهاية الدراسة التي استمرّت خمس سنوات، ومن أجل تقييم تأثير الدواء، تمّت مقارنة أعداد النساء المصابات بسرطان الثدي المنتشر في كلّ مجموعة، وكذلك عدد النساء المصابات بأنواع أخرى من السرطان. في أداة خطر سرطان الثدي، أورد المعهد الوطني للسرطان انخفاض الخطر النسبي: «تمّ تشخيص النساء [اللواتي يتناولن عقار تاموكسيفين] بسرطان الثدي المنتشر بنسبة أقلّ بـ 49 %». يبدو الرقم الكبير البالغ 49% مثيراً للإعجاب. مع ذلك، عند تحديد الآثار الجانبية المحتملة، تمّ تقديم الخطر المطلق: «... كان المعدّل السنوي لسرطان الرحم في فرع تاموكسيفين [من التجربة] 23 من كلّ 10,000 مقارنة بـ 9.1 من كلّ 10,000 في فرع العلاج الوهمي». ويبدو أنّ هذه الأجزاء الصغيرة تشير إلى أنّ خطر الإصابة بسرطان الرحم نتيجة العلاج بعقار تاموكسيفين لا يتغيّر كثيراً. بالتالي، وسواء عن وعي أو عن غير وعي، فقد أقدم باحثو المعهد الوطني للسرطان، أثناء جمع البيانات الخاصّة بأداة المعلومات المتعلّقة بالمخاطر، على التركيز على فوائد عقار تاموكسيفين في خفض حالات الإصابة بسرطان الثدي والحدّ في الوقت نفسه من

التركيز على ارتفاع خطر الإصابة بسرطان الرحم. ولو تمّ استخدام هذه الأرقام لحساب الخطر النسبي، وذلك لوضع الإحصائيتين على أرضيّة متكافئة، لكان من المنطقي الإشارة إلى ارتفاع خطر الإصابة بسرطان الرحم بنسبة 153% مقابل انخفاض خطر الإصابة بسرطان الثدي بنسبة 49%.

حتّى في ملخّص المقالة الأصلية، يتمّ استخدام نسبة 49% للإشارة إلى انخفاض نسبة الإصابة بسرطان الثدي، بينما يعبَّر عن الزيادة في سرطان الرحم من خلال معدّل خطر نسبي يبلغ 2.53. ويعدّ استخدام النسب المئوية بدلاً من الكسور العشرية لتسليط الضوء على الفوائد المتصوَّرة إحدى الحيل الأخرى التي يشار إليها باسم «تحيّز النسبة»[107]. وقد تمّ تأكيد مدى تأثّرنا بتحيّز النسبة في تجارب بسيطة طُلب فيها من أشخاص معصوبي الأعين اختيار حبّة سكاكر هلامية من صينية بشكل عشوائي[108]. وباختيار حبّة حمراء، يفوز الشخص بدولار واحد. وعند إعطاء المشاركين الخيار بين صينية تحتوي على تسع حبّات بيضاء وحبّة واحدة حمراء أو صينية تحتوي على 91 حبة بيضاء وتسع حبّات حمراء، تمّ اختيار الصينية الثانية أكثر من الأولى، على الرغم أنّها تمنح فرصة أقلّ لاختيار حبّة الهلام الفائزة. ويُحتمل أن يرجع ذلك إلى أنّ العدد الأكبر من الحبّات الحمراء على الصينية يُنتج تصوّراً بوجود فرصة أكبر لاختيار إحداها بغضّ النظر عن عدد حبّات السكاكر الأخرى. وقد علّق أحد المشاركين قائلاً: «لقد اخترت تلك التي تحتوي على حبوب حمراء أكثر، فقد بدت كأنّها تشتمل على طرق أوفر للفوز».

أظهرت الأرقام المطلقة في الدراسة التي أجريت حول تاموكسيفين أنّ حالات سرطان الثدي المنتشر انخفضت من 261 لكلّ 10,000 امرأة بدون علاج إلى 133 لكلّ 10,000 امرأة خاضعة للعلاج به. لكنّ المفارقة أنّه لو تمّ استبعاد تحيّز النسبة والتأطير غير المتطابق لصالح الأرقام المطلقة، لاستطاع مستخدمو أداة سرطان الثدي أن يروا بسهولة أنّ إجمالي حالات سرطان الثدي التي تمّ تجنّبها (128 من كلّ 10,000) تفوق بكثير سرطانات الرحم الناتجة عن العلاج (14 من كلّ 10,000)، من دون الحاجة إلى التلاعب بالبيانات السريرية الأصلية.

المواقف الانكفائية

على الأرجح، تتمّ غالبية التحريفات الإحصائية في السياق الطبّي عن غير وعي، من قبل باحثين غير مدركين لبعض المآزق الإحصائية الشائعة. ففي التجارب السريرية مثلاً، من المعتاد

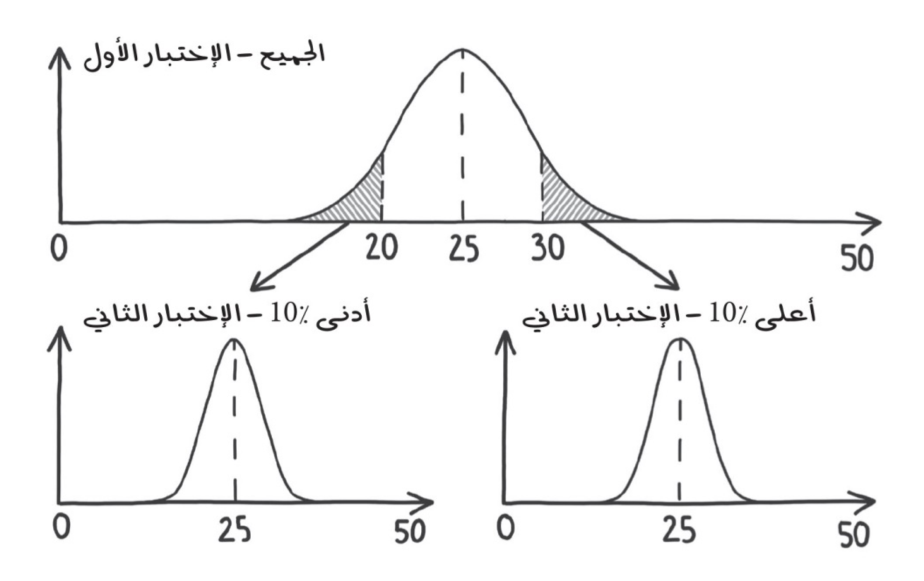
أخذ مجموعة من المرضى، وإعطائهم العلاج المقترح لأمراضهم، ومراقبة مدى تحسّنهم من أجل فهم تأثير الدواء. وفي حال تراجع حدّة الأعراض، من الطبيعي إرجاع التحسّن إلى العلاج.

تخيّلوا، على سبيل المثال، أن تجمعوا عدداً كبيراً من الأشخاص الذين يعانون من آلام المفاصل وتطلبوا منهم الجلوس مكتوفي الأيدي بينما تلدغونهم بالنحل الحيّ. (مع أنّ هذا يبدو غريباً، إلّا أنّه علاج بديل حقيقي يُعرف باسم الوخز بإبر النحل. نمت شعبية هذا العلاج مؤخّراً، ويرجع ذلك جزئيّاً إلى الترويج له من قِبل غوينيث بالترو على موقعها الإلكتروني Goop). والآن، تخيّلوا أنّ ألم المفاصل يزول بأعجوبة لدى بعض المصابين - في المتوسّط، يبدأون بالشعور بالتحسّن بعد العلاج. هل يمكن أن نستنتج أنّ الوخز بإبر النحل هو علاج فعّال لآلام المفاصل؟ على الأغلب لا. في الواقع، ما من دليل علمي يدعم فاعليّة الوخز بإبر النحل لعلاج أيّ اضطراب صحّي كان. لا بل إنّ الآثار السلبية للعلاج بسمّ النحل شائعة، ومن المعروف أنّها قتلت مريضاً واحداً على الأقلّ. فكيف يمكن أن نفسّر النتائج الإيجابية لتجربتنا الافتراضية؟ وما السبب وراء تحسّن المرضى؟

ثمّة حالات مثل آلام المفاصل تتفاوت حدّتها مع مرور الوقت. ومن المحتمل أن يكون الأشخاص الذين تمّ تجنيدهم لإجراء التجربة، خاصّةً بالنسبة إلى علاج متطرّف وبديل إلى هذا الحدّ مثل الوخز بإبر النحل، يائسون لإيجاد حلّ لأوجاعهم. وإذا تلقّوا العلاج في فترة ذروة الألم، فمن المحتمل جداً أن يشعروا في وقت لاحق بالتحسّن بصرف النظر عن فوائد العلاج. تُعرف هذه الظاهرة باسم «الانكفاء إلى الوسط». وهي تؤثّر على العديد من التجارب التي تشتمل نتائجها على عنصر العشوائية.

لفهم كيفية عمل ظاهرة الانكفاء إلى الوسط بشكل أفضل، خذ مثالاً نتائج اختبار دراسي. ولتكن حالة قصوى يُطلب فيها من الطلّاب الإجابة عن 50 سؤالاً متعدّد الخيارات بـ»نعم/كلّا» حول موضوع لا يعرفون عنه شيئاً. مع تخمين الطلّاب بشكل عشوائي تماماً، يمكن أن تتراوح درجات الاختبار من صفر حتّى 50، ولكن سيكون ثمّة عدد قليل جدّاً من الأشخاص الذين سيجيبون بشكل صحيح على عدد صغير فقط من الأسئلة، وعدد قليل جدّاً لن يخطئوا في أيّ من الإجابات تقريباً. من توزيع الدرجات المعروض في الشكل 20، من الواضح أنّ عدداً أكبر من الأشخاص سيحصلون على درجات متوسّطة تقارب 25. إذا حلّلنا الطلّاب الذين احتلّوا نسبة 10% الفضلى، فستكون درجاتهم، بحكم تعريفها، أعلى بكثير من متوسّط المجموعة بأكملها. فهل يجب أن نتوقّع من هؤلاء الطلّاب أداء أعلى بكثير من المتوسّط عند إعادة اختبارهم بأسئلة جديدة؟ بالطبع لا. بل نتوقّع

مرّة أخرى أن تتوزّع نتائجهم بالتساوي حول درجة 25 المتوسّطة. وينطبق الأمر نفسه إذا قمنا بإعادة اختبار الطلّاب الذين احتلّوا نسبة 10% الأدنى. فالأفراد الذين اخترناهم على أساس درجاتهم القصوى في الاختبار الأوّل سيكونون، في المتوسّط، قد انكفأوا نحو الوسط في الاختبار الثاني.



الشكل 20: توزيع العلامات في استبيان من 50 سؤال «نعم/كلّا» متعدّد الخيارات. عند إعادة اختبار الأشخاص الذين حصلوا على أعلى 10% من النقاط (المنطقة المظلّلة اليمنى)، نجد أنّ متوسّط مجموعهم يساوي متوسّط المجموع العامّ. وينطبق الأمر نفسه على أصحاب أدنى 10% من النقاط (المنطقة المظلّلة اليسرى). هذا يعني أنّ كلا المجموعتين، أي أصحاب المجموع الأعلى وأصحاب المجموع الأدنى، قد انكفأتا إلى الوسط.

في الامتحانات الحقيقية، تلعب المهارة وأخلاقيّات العمل دوراً مهمّاً في تحديد نتائج الطالب، ولكن من المحتمل أن يكون لعنصر الحظّ أيضاً دور في ما يتعلّق بالأسئلة التي تطرح في الامتحان والمواضيع التي أعطيت الأولويّة في أثناء المراجعة. لكن ما لم يتوافر عنصر عشوائي ما، فسوف يسجّل الانكفاء إلى الوسط تأثيره. في الواقع، يعتبر عنصر الحظّ بارزاً بشكل خاصّ في الاختبارات متعدّدة الاختيارات، والتي يمكن فيها حتّى للطالب الذي لا يتمتّع بالمعرفة المطلوبة تخمين الإجابة الصحيحة. ففي إحدى الدراسات التي أجريت في عام 1987، تمّ منح 25 طالباً أميركياً قلقين من خوض الامتحان، والذين كان أداؤهم سيّئاً بشكل غير متوقّع في الاختبار الدراسي متعدّد الاختيارات (SAT)، عقار بروبرانولول المستخدم لارتفاع ضغط الدم وإعادة اختبارهم[109]. وأوردت صحيفة *نيويورك تايمز* نتائج الدراسة في مقالة جاء فيها أنّ «عقاراً يستخدم للسيطرة على ارتفاع ضغط الدم قد حسّن بشكل كبير نتائج اختبار القدرات الدراسية للطلّاب الذين يعانون من قلق شديد على نحو غير اعتيادي...» هكذا تمكّن الطلاب الذين تناولوا بروبرانولول من تحسين درجاتهم، في المتوسّط،

بمعدّل 130 نقطة على مقياس من 400-1600. للوهلة الأولى، يبدو أنّ للعقار تأثير كبير على الأداء. لكن اتّضح أنّه حتّى الطلّاب غير القلقين الذين أعادوا الاختبار حسّنوا مجموع علاماتهم بنحو 40 نقطة. في الواقع، عندما نأخذ بالاعتبار أنّ الطلّاب تمّ اختيارهم تحديداً لأنّ أداءهم كان أسوأ ممّا يشير مستوى ذكائهم أو مؤشّرات أكاديمية أخرى، فلن يكون من المستغرب أن يتحسّن مجموعهم بشكل كبير، حتّى بدون بروبرانولول، نتيجة انكفائهم إلى الوسط.

في ظلّ غياب مجموعة مماثلة من الطلّاب ذوي الأداء الضعيف الذين أعادوا الاختبار من دون تناول الدواء - ما يسمّى بـ «مجموعة التحكّم» - من المستحيل تحديد آثار التدخّل. وبناءً على المجموعة التي أُخضعت للعلاج، من المغري أن نعزو تحسّن الأداء إلى تأثير الدواء. مع ذلك، تُظهر نتائج الاختبار متعدّد الخيارات العشوائي البحت أنّ انكفاء مجموعة متطرّفة نحو الوسط هو ظاهرة إحصائية بحتة.

* * *

يعدّ تجنب الاستدلال الزائف للسببية بالغ الأهمّية في التجارب الطبّية. من طرق ذلك (كما رأينا في الفصلين 2 و3) إجراء تجربة عشوائية موجَّهة يتمّ فيها توزيع المرضى على إحدى مجموعتين عشوائيّاً. وكما هو الحال في تجربة تاموكسيفين لسرطان الثدي، يتلقّى المرضى في «فرع العلاج" العلاج الحقيقي، بينما يتمّ إعطاؤهم في «الفرع الموجَّه" علاجاً وهمياً. وفي حال كان كلّ من المرضى ومقدّمي العلاج يجهلون إلى أيّ فرع من التجربة ينتمي المريض، تُعرف التجربة أنّها مزدوجة التعمية - وهي تعتبر على نطاق واسع المعيار الذهبي للتجارب السريرية. في تجربة عشوائية موجَّهة ومزدوجة التعمية، يمكن أن يعزى أيّ اختلاف بين التحسّن في المجموعة الموجّهة والتحسّن في مجموعة العلاج إلى العلاج فقط، مع استبعاد الانكفاء إلى الوسط.

تاريخياً، اعتُبر أيّ تحسّن للمرضى في فرع التجربة الموجّه أنّه من تأثير الدواء الوهمي - أي فائدة تلقي ما يُعتبر علاجاً، حتّى لو كان مجرد حبّة سكّر. مع ذلك، بدأ يتّضح بشكل متزايد أنّ هذا التأثير يتكوّن من ظاهرتين مختلفتين تماماً. جزء، ربّما أصغر، يتمثّل في التأثير النفسي الجسدي الحقيقي الذي يجعل المرضى يشعرون بالتحسّن لاعتقادهم أنّهم يتلقّون علاجاً. فيؤدّي هذا التأثير «للدواء الوهمي الحقيقي» إلى تغيير فعليّ في حكم المريض على أعراضه. وتكون الفائدة النفسية الجسدية أكبر إذا علم المريض أنّه يتلقّى العلاج الحقيقي، وكذلك، وهذا هو الأمر المثير للاهتمام، إذا كان الشخص الذي يعطي العلاج يعلم بذلك، ومن هنا سبب التعمية المزدوجة.

السبب الآخر، وقد يكون الأهمّ، لتحسّن المرضى في الفرع الموجّه هو الانكفاء إلى الوسط. هذا التأثير الإحصائي البسيط لا يفيد المرضى على الإطلاق. والطريقة الوحيدة لتحديد الأهمّ بين مكوّنَي العلاج الوهمي هي مقارنة آثار العلاج الوهمي بآثار عدم العلاج على الإطلاق. غالباً ما تُعتبر هذه الأنواع من التجارب غير أخلاقية، ولكن تمّ إجراء دراسات كافية في الماضي للإشارة إلى أنّ معظم التأثير الوهمي المزعوم هو في الواقع نتيجة الانكفاء إلى الوسط - ولا يستمدّ منه المرضى فائدة تُذكر[110].

يزعم العديد من مؤيّدي الطبّ البديل أنّه حتّى لو كان علاجهم مجرّد تأثير دواء وهمي، فإنّ فائدة الدواء الوهمي قد تكون كبيرة وتستحقّ العناء. مع ذلك، إذا كان معظم تأثير الدواء الوهمي ناتجاً عن الانكفاء إلى الوسط، ولا يوفّر أيّ فائدة للمريض، فإنّ هذه الحجّة غير متينة. يجادل معلّمو الطبّ البديل الآخرون أنّه بدلاً من إنفاق الجهود على «تجارب سريرية اصطناعية»، من المهمّ النظر في نتائج «عالم الواقع» - أو بتعبير آخر، على «نتائج التجارب غير الموجَّهة التي تركّز فقط على كيفيّة تغيّر ظروف المرضى بعد العلاج». ولا عجب أنّ أولئك «الدجّالين» يتشبّثون بأيّ حجّة تسمح لهم بإساءة تفسير آثار الانكفاء إلى الوسط عمداً على أنّها فائدة سببية حقيقية لعلاجاتهم غير العلمية. وكما قال أبتون سنكلير، الحائز على جائزة بوليتزر: «من الصعب على المرء أن يفهم أمراً ما إذا كان راتبه يعتمد على عدم فهمه».

* * *

بعيداً عن الطبّ، فإنّ للانكفاء إلى الوسط عواقب بعيدة المدى أيضاً في تفسير السبب والنتيجة في سياق سنّ القوانين. ففي السادس عشر من أكتوبر 1991، جلست سوزانا غراشيا، البالغة من العمر 32 عاماً، لتناول الطعام مع والديها في كافيتيريا لوبي في كيلين، بولاية تكساس. في ساعة الذروة، كان المطعم مزدحماً بشكل غير اعتيادي مع احتشاد أكثر من 150 شخصاً حول الطاولات المربّعة. عند الساعة 12:39، قام جورج هينارد، وهو تاجر بحري عاطل عن العمل، بقيادة شاحنته الصغيرة من طراز فورد رينجر باتّجاه المطعم، وتوجّه مباشرة عبر النافذة الأمامية إلى قاعة تناول الطعام. ثمّ قفز من باب السائق، وأمسك مسدّس غلوك 17 بيد، ومسدّس روجر بي 89 باليد الأخرى، وبدأ بإطلاق النار.

اعتقدت غراشيا ووالداها في البداية أنّها عملية سطو مسلّح. فانحنوا على الأرض وقلبوا الطاولة لوقايتهم من الرصاص. ومع استمرار إطلاق النار، اتّضحت لغراشيا الحقيقة المروّعة أنّ هدف الرجل لم يكن سرقة المطعم، بل القتل العشوائي لأكبر عدد ممكن من الناس.

اقترب المسلّح وأصبح على بعد أمتار قليلة من طاولتهم. فمدّت غراشيا يدها إلى محفظتها. كانت تخبّئ فيها مسدّس سميث آند ويسون من عيار 38، حصلت عليه قبل عدّة سنوات للدفاع عن النفس. لكن فجأة تجمّدت الدماء في عروقها. فقد تذكّرت أنّها اتّخذت قراراً من باب الحذر بترك المسدّس تحت مقعد الراكب في سيّارتها حتّى لا تخالف قانون الأسلحة المخفيّة المطبّق في تكساس. وتقول إنّه كان أغبى قرار في حياتها.

قرّر والد غراشيا بشكل بطولي مواجهة المسلّح قبل مقتل كلّ من في المطعم. فخرج من خلف طاولته واندفع نحو هينارد. غير أنّه لم يتقدّم أكثر من بضعة أقدام، قبل أن يطلق عليه الرصاص في صدره، ويسقط على الأرض إثر جروح قاتلة. بحثاً عن مزيد من الضحايا، استدار هينارد عن الطاولة التي اختبأت وراءها غراشيا ووالدتها. في الوقت نفسه، أقدم زبون آخر، يدعى تومي فوغان، على الإلقاء بنفسه من نافذة في الجزء الخلفي من المطعم في محاولة يائسة للفرار. رأت غراشيا في النافذة المحطّمة طريقاً محتملاً للهرب، فأمسكت بأمّها، أورسولا، وأصرّت عليها قائلة: «هيّا بنا علينا أن نهرب، علينا أن نخرج من هنا». ركضت بأسرع ما يمكنها، واستطاعت الخروج من النافذة سالمة. التفتت لتتأكّد من أنّ والدتها تتبعها، لكنّها وجدت نفسها بمفردها. بدلاً من ذلك، كانت أورسولا قد زحفت إلى حيث استلقى زوجها يحتضر واحتضنت رأسه. فما كان من هينارد إلّا أن عاد ببطء، وبشكل منهجي وواثق، إلى المكان الذي جلست فيه، وأطلق الرصاص على رأسها.

كان والدا غراشيا اثنين من بين الضحايا الـ 23 الذين قتلهم هينارد في ذلك اليوم، بالإضافة إلى 27 جريحاً آخرين. وكان آنذاك أسوأ حادث إطلاق نار جماعي في تاريخ الولايات المتّحدة. مضت غراشيا لإعطاء شهادتها القويّة في جميع أنحاء البلاد، دعماً لتشريع حمل الأسلحة المخفيّة. قبل مجزرة لوبي التي وقعت في عام 1991، كان لدى 10 ولايات قوانين تخوّل حمل الأسلحة «الخفيّة». وتشترط هذه القوانين أن يلبّي مقدّم الطلب مجموعة من المعايير الموضوعية لكي يتمّ منحه إجازة لحمل سلاح مخفيّ - من دون أيّ سلطة تقديرية من جانب مُصدر الإجازة. وبين عامي 1991 و1995، أقرّت 11 ولاية أخرى قوانين مماثلة. وفي 1 سبتمبر 1995، وقّع جورج دبليو بوش قانوناً لتليها تكساس.

بطبيعة الحال، ونظراً لأنّ تنظيم استخدام الأسلحة يمثّل قضيّة خلافية في الولايات المتّحدة، كان ثمّة اهتمام كبير في فهم آثار قوانين حمل السلاح المخفيّ على جرائم العنف. فقد رأى المدافعون عن تنظيم حمل الأسلحة أنّ ازدياد الأسلحة المخفيّة قد يؤدّي إلى تصاعد النزاعات البسيطة نسبيّاً

إلى صدامات قاتلة، فضلاً عن زيادة عدد الأسلحة المتاحة للفصائل الإجرامية. بينما اقترح لوبي حقوق حمل السلاح أنّ ارتفاع احتمال كون ضحيّة المعتدي مسلّحاً قد يردع المجرمين المحتملين، أو على الأقلّ يتيح للمواطنين محاولة إنهاء عملية إطلاق نار جماعي بشكل أسرع. ويبدو أنّ الدراسات الأولى التي قارنت معدّلات الجريمة قبل إدخال القوانين بتلك التي تليها تشير إلى أنّ معدّلات القتل والجرائم العنيفة قد انخفضت بعد إصدار هذه القوانين مباشرة[111].

مع ذلك، عادة ما يتمّ إهمال عاملَين في هذه الدراسات. الأوّل، انخفاض جرائم العنف في جميع أنحاء البلاد في الوقت الذي تمّ فيه تطبيق عدد كبير من قوانين حمل الأسلحة المخفيّة. فبين عامي 1990 و2001، ساهمت الزيادة في ضبط الأمن، وتزايد أعداد السجون، وتراجع الإدمان على الكوكايين في انخفاض عدد جرائم القتل في جميع أنحاء الولايات المتّحدة من نحو 10 لكلّ 100,000 في السنة إلى نحو 6 لكلّ 100,000 في السنة[112]. كما انخفض معدّل انتشار جرائم القتل بالمقدار نفسه تقريباً في الولايات التي تجيز حمل السلاح المخفيّ وتلك التي لا تجيزه. فعندما تتمّ دراسة معدّلات القتل في الولايات التي تجيز حمل السلاح المخفيّ نسبةً إلى المعدّل الإجمالي لجرائم القتل في الولايات المتّحدة، فإنّ التأثير المقترح لقوانين حمل السلاح المخفيّ ينخفض بشكل كبير. ولعلّ الأهمّ من ذلك هو ما توصّلت إليه إحدى الدراسات، أنّه بمجرّد أخذ الانكفاء إلى الوسط بعين الاعتبار، فإنّ البيانات «... لا تدعم إطلاقاً فرضيّة أنّ قوانين ترخيص حمل السلاح لها آثار إيجابية في خفض معدّلات القتل»[113]. فكان من الشائع للولايات إصدار قوانين تبيح حمل السلاح المخفيّ استجابةً لمستويات الجريمة العنيفة المتزايدة. وانخفاض معدّلات القتل النسبية بعد تطبيقها لا يبدو أنّه كان مرتبطاً بقوانين إباحة حمل السلاح المخفيّ. بدلاً من ذلك، تبيّن أنّ القوانين ارتبطت بزيادة معدّلات القتل النسبية قبل تطبيقها. وهذا ما أعطى انطباعاً خاطئاً عن فاعليّة القوانين، حيث إنّ معدّلات الجريمة انخفضت بشكل طبيعي من مستوياتها المرتفعة على نحو غير طبيعي.

كشف الزيف

لا يزال النقاش محتدماً حول قانون حيازة الأسلحة في الولايات المتّحدة اليوم. ففي أعقاب إطلاق النار الذي وقع في لاس فيغاس، في أكتوبر 2017، والذي قُتل فيه 58 شخصاً وجُرح المئات، شارك سيباستيان غوركا، الذي أعفي مؤخّراً من مهامه في البيت الأبيض، في نقاش حول طاولة مستديرة بشأن تقنين حمل السلاح. كما رأينا في بداية هذا الفصل، ليس من الغريب على

غوركا تقديم ادّعاءات جريئة لا تستند إلى أدلّة، وقد خاض نقاشاً حول تقييد مبيعات الأسلحة النارية وملحقاتها، وأخذ النقاش في اتّجاه غير متوقّع:

> *... لا يتعلّق الأمر بالأسلحة نفسها. المشكلة الكبرى التي نواجهها ليست حوادث إطلاق النار الجماعي، لأنّها حالات شاذّة. فنحن لا نشرّع على أساس الشوارد. قضيتنا الكبيرة هي الجرائم المسلّحة التي يرتكبها الأفارقة السود ضدّ الأفارقة السود... شباب سود يقتلون بعضهم بعضاً بالعشرات.*

إذا افترضنا أنّ غوركا كان يشير إلى الأميركيين من أصل أفريقي، فإنّ كلامه يبدو إلى حدّ كبير إعادة صياغة للإحصائيّات الخاطئة التي أثبتنا عدم دقّتها سابقاً في هذا الفصل. إذ يبرز تجاوز غوركا المتكرّر إحدى الحالات التي يجب أن نكون فيها أكثر حذراً ضدّ الإحصائيّات غير الدقيقة: الجاني المتسلسل. فمن غير المرجّح للأشخاص الذين أبدوا تجاهلاً لدقّة أرقامهم في الماضي أن يكونوا أكثر دقّة في المستقبل. في هذا الإطار، يقوم غلين كيسلر من واشنطن بوست، وهو أحد روّاد التدقيق في الحقائق السياسية، بتحليل وتقييم تصريحات السياسيين بانتظام على مقياس من «بينوكيو» واحد إلى أربعة، اعتماداً على درجة تحويرهم للحقيقة. فتظهر الأسماء نفسها مراراً وتكراراً في تقاريره.

ثمّة علامات أخرى أكثر دقّة تشير إلى تلاعب إحصائي. في الواقع، إذا كان مقدّمو الأرقام واثقين من صحّتها، فلن يتردّدوا في إعطاء السياق والمصدر ليتمّ التحقّق منهما. وكما هو الحال مع تغريدة غوركا عن الإرهاب، يُعتبر الفراغ السياقي علماً أحمر عندما يتعلّق الأمر بالمصداقية. ويُعتبر غياب التفاصيل حول نتائج الاستطلاع، بما في ذلك حجم العيّنة والأسئلة المطروحة ومصدر العيّنة - كما رأينا في حملة لوريال الإعلانية المحظورة - إشارة تحذير أخرى. أمّا عدم تطابق الأطر والنسب المئوية والفهارس والأرقام النسبية من دون أرقام مطلقة، كما هو الحال مع «أداة مخاطر الإصابة بسرطان الثدي» التابعة للمعهد الوطني للسرطان، فيستدعي دقّ نواقيس الخطر. ويُعتبر الاستدلال الزائف للتأثير السببي من دراسات غير موجّهة أو بيانات أُخذت من عيّنات فرعية - كما نرى غالباً في الاستنتاجات المستخلصة من تجارب الطبّ البديل - حيلاً أخرى ينبغي الحذر منها. وفي حال الارتفاع أو الهبوط المفاجئ لإحصائيّة متطرّفة في الأساس - كما حدث مع الجريمة المسلّحة في الولايات المتّحدة - فابحثوا عن الانكفاء إلى الوسط.

عموماً، عندما تُطرح إحصائيّات في طريقكم، اسألوا أنفسكم، «ما هي المقارنة؟»، «ما هو الدافع؟» و«هل هذه هي القصّة الكاملة؟». فالعثور على هذه الإجابات الثلاثة سيقودكم في طريق طويل نحو تحديد صحّة الأرقام. وعدم القدرة على إيجاد الإجابات هو جواب بحدّ ذاته.

* * *

عديدة هي الطرق لعدم كشف الحقيقة كاملة باستخدام الرياضيّات. فالإحصائيّات التي يتمّ الإعلان عنها في الصحف، والترويج لها في الإعلانات، أو تلك التي يطلقها السياسيون، مضلّلة غالباً، وخادعة أحياناً، لكنّها نادراً ما تكون صحيحة تماماً. أمّا بذور الحقيقة فتكمن عادة في أرقامها، لكنّها نادراً ما تكون كاملة. في بعض الأحيان، تنتج هذه التشويهات عن تحريف متعمّد، وفي أحيان أخرى لا يكون صاحبها مدركاً فعلاً للتحيّز أو الأخطاء التي يرتكبها في حساباته. وسنستكشف العواقب الكارثية لهذه الأخطاء الرياضيّة الحقيقية في سياقات أكثر أهمّية في الفصل التالي.

في كتاب كلاسيكي تحت عنوان *كيف تكذب بالإحصائيّات*، يشير داريل هوف إلى أنّه «على الرغم من القاعدة الرياضيّة، فإنّ الإحصائيّات فنّ بقدر ما هي علم». وفي النهاية، يجب أن تعتمد درجة تصديقنا للإحصائيّات التي نصادفها على مدى اكتمال الصورة التي يرسمها الفنّان لنا. إذا كان المشهد واقعياً ومفصّلاً بشكل مستفيض، مع سياق ومصدر موثوق، وعروض واضحة، وسلاسل منطقية، فيجب أن نثق بصحّة الأرقام. أمّا إذا كان الادّعاء مستنبطاً بشكل مشكوك فيه، تدعمه إحصائية فردية بسيطة على قماش فارغ، فينبغي أن نفكّر مليّاً في ما إذا كان يجدر بنا تصديق هذه «الحقيقة».

5

المكان والزمان الخاطئَين:
تطوّر نظم الأعداد لدينا وكيف تخذلنا

كان أليكس روزيتو ولوك باركين في عامهما الثاني من شهادة العلوم الرياضيّة في جامعة نورثمبريا. في مارس 2015، شاركا في تجربة مصمّمة للتحقيق في آثار الكافيين على ممارسة الرياضة. وكان من المفترض فيها إعطاء الطلّاب 0.3 غرام من الكافيين، قبل أن يبدأوا بالحركة. لكن بدلاً من ذلك، وبسبب خطأ رياضي بسيط، وجدوا أنفسهم في العناية المركّزة يكافحون من أجل البقاء.

بعد شرب الكافيين، المذاب في مزيج من عصير البرتقال والماء، وافق روزيتو وباركين على المشاركة في تجربة أداء رياضية شائعة، معروفة باسم اختبار وينغايت. طُلب فيها من المشاركين ركوب درّاجة للتمارين الرياضية والدوس عليها بأسرع ما يمكن لمعرفة كيف يؤثّر الكافيين على ناتج الطاقة اللاهوائية. لكن بعد وقت قصير من تناول كوكتيل الكافيين، وقبل أن يقترب المشاركون حتّى من الدرّاجات، بدأوا يشعرون بالدوار، وأبلغوا أنّهم يعانون من عدم وضوح الرؤية وخفقان القلب. فتمّ نقلهم على الفور إلى قسم الطوارئ، ووضعوا على آلات غسيل الكلى. وعلى مدار الأيّام التالية، فقد كلّ من روزيتو وباركين نحو 12.7 كغ من وزنهما.

بدلاً من إعطاء المشاركين 0.3 غرام من مسحوق الكافيين، ارتكب الباحثون الذين أجروا الاختبار خطأً عند حساب الجرعة، وذوّبوا 30 غراماً في كوب العصير. فابتلع الطلّاب ما يعادل نحو 300 كوب من القهوة العادية في بضع ثوان. ومن المعروف أنّ 10 غرامات تعدّ قاتلة لدى البالغين. لحسن حظّ روزيتو وباركين، كان كلاهما شابّين وبحالة صحّية تسمح بتحمّل تلك الجرعة الزائدة الهائلة مع قليل من الآثار طويلة الأجل.

وقع الخطأ لأنّ الباحثين الذين أجروا الاختبار طبعوا الفاصلة العشرية في هواتفهم المحمولة على مسافة فراغَين إلى اليمين، بحيث حوّلوا 0.30 جرام إلى 30 جراماً. وليست هذه المرّة الأولى

التي يكون فيها للفاصلة العشرية في غير محلّها نتائج كارثية. فقد سبق ووقعت أخطاء مشابهة كانت لها عواقب تتراوح من المضحكة إلى السخيفة، لا بل وحتّى القاتلة.

* * *

في ربيع عام 2016، أرسل عامل البناء مايكل سيرجنت فاتورة بمبلغ 446.60 جنيه استرليني بعد الانتهاء من عمل استمرّ لمدّة أسبوع. بعد بضعة أيّام، كانت دهشته كبيرة لإيجاده 44,660 جنيهاً استرلينياً في حسابه المصرفي بعد أن وضع مدير الشركة الذي استلم الفاتورة الفاصلة العشرية في غير موضعها. فعاش سيرجنت لبضعة أيّام حياة نجم روك. أنفق آلاف الجنيهات على سيّارة جديدة، وعلى المخدّرات، والشراب، والقمار، والملابس، والساعات، والمجوهرات باهظة الثمن، قبل أن تقبض عليه الشرطة أخيراً. فاضطرّ سيرجنت لردّ الأموال المتبقّية واستكمال خدمة مجتمعية بسبب انتهازيّته تلك.

على نطاق أوسع بكثير، في الفترة التي سبقت الانتخابات العامّة في المملكة المتّحدة عام 2010، نشر حزب المحافظين وثيقة تسلّط الضوء على التباينات بين المناطق الغنيّة والفقيرة في المملكة المتّحدة في ظلّ حكومة العمل الحاليّة. بحسب الوثيقة، فإنّ 54% من الفتيات في المناطق الأكثر حرماناً في بريطانيا حملن قبل بلوغهنّ سنّ 18 عاماً، مقارنة بـ 19% في مناطق بريطانيا الأكثر ثراءً. لكن بدلاً من أن تشكّل الأرقام توبيخاً لاذعاً، وتسلّط الضوء على التفاوت الاجتماعي المفترض الذي تمّ تعزيزه خلال 13 عاماً من حكم حزب العمّال، انقلبت الأرقام رأساً على عقب عندما أشار المعلّقون والسياسيون في الحزب إلى أنّ الأرقام لا تتجاوز في الحقيقة 5.4% و1.9% فقط. بصرف النظر عن الخطأ الفادح الذي ارتُكب بالفاصلة العشرية، فقد استُخدم الموقف الواثق الذي أشار به المحافظون إلى أنّ أكثر من نصف الفتيات في بعض المناطق حملن في سنّ المراهقة كدليل على مدى انشغال المحافظين عن ناخبيهم. لكن على الرغم من الحرج الكبير الذي شعر به المحافظون بسبب الفواصل العشرية المضلّلة، إلّا أنّهم مضوا للفوز في الانتخابات العامّة لعام 2010، وتبيّن أنّ خطأهم لم يكن قاتلاً.

لم يكن الأمر بتلك البساطة بالنسبة إلى المتقاعدة ماري ويليامز، البالغة من العمر 85 عاماً. ففي الثاني من يونيو من عام 2007، قامت الممرّضة المجتمعية جوان إيفانز بزيارة السيّدة ويليامز، كخدمة لزميل لها. كُلّفت إيفانز بإعطاء مريضة السكّري جرعة الأنسولين لذلك اليوم. فملأت قلم حقن الأنسولين بالـ 36 «وحدة» المطلوبة، لكن بينما كانت تحاول حقن المادّة، توقّف القلم. فحاولت مجدّداً مع القلمين الآخرَين اللذين أحضرتهما، لكنّ كلّاً منهما توقّف عن الحقن أيضاً. خشيت

الممرّضة ممّا يمكن أن يحدث للسيّدة ويليامز إذا لم تحصل على جرعتها من الأنسولين، فعادت إلى سيّارتها لإحضار حقنة عادية. مع أنّه تمّ تعليم الأقلام بـ«وحدات» الأنسولين والحُقن بالملليلترات، إلّا أنّ إيفانز كانت تعرف أنّ «الوحدة» تعادل 0.01 مل. فملأت الحقنة التي تبلغ سعتها 1 مل وضخّتها في ذراع السيّدة ويليامز. ثمّ كرّرت العمليّة ثلاث مرّات لاستكمال الجرعة، من دون التوقّف للتساؤل عن سبب اضطرارها لإعطاء عدّة حقن في حين أنّ جرعة واحدة كانت تكفي مرضاها الآخرين. بعد انتهاء المهمّة أخيراً، تركت السيّدة ويليامز وتابعت جولتها. ولم تدرك خطأها الفظيع إلّا في وقت لاحق من ذلك اليوم. فبدلاً من 0.36 مل من الأنسولين، أعطيت المريضة 3.6 مليلتر، أي 10 مرّات أكثر من اللازم. اتّصلت الممرّضة بالطبيب على الفور، لكن بحلول ذلك الوقت، كانت السيّدة ويليامز قد أصيبت أساساً بنوبة قلبية قاتلة بفعل الأنسولين.

مع أنّه من السهل انتقاد المخطئين في هذه القصص والسخرية من أخطائهم البديهية، إلّا أنّ انتشار مثل هذه الحالات يثبت أنّ الأخطاء البسيطة يمكن أن تحدث، لا بل وتحدث بالفعل، وغالباً ما تكون لها عواقب وخيمة. ترجع خطورة تداعيات هذه الأخطاء جزئيّاً إلى نظام قيمة المنازل العشرية. ففي رقم مثل 222، تمثّل كلّ 2 عدداً مختلفاً: 2، و20، و200، وكلّ منها أكبر من سابقتها بعشر مرّات. وعامل التحجيم، 10، هو الذي يجعل وضع الفاصلة العشرية في المكان الخطأ أمراً بالغ الخطورة. لكن ربّما لو استخدمنا النظام الثنائي، أي ذاك الذي تستند إليه كلّ تقنيّتنا المحوسبة الحديثة، والتي تكون كلّ منزلة فيها هي مجرّد عامل أكبر بمرّتين من سابقه - يمكننا تجنّب هذه الأخطاء. فحقن جرعة مضاعفة من الأنسولين أو جرعة أكبر بأربع مرّات من الكافيين قد لا يكون له مثل هذه التداعيات الخطيرة.

سنستكشف في هذا الفصل، المزيد من الأخطاء المكلفة الناتجة عن الأنظمة العددية التي نستخدمها في حياتنا اليومية. وسنكتشف التأثير الخفيّ في أغلب الأحيان لأنظمة عددية تبدو مهجورة منذ زمن طويل وتوفّر نافذة على تاريخنا البشري كما تلقي الضوء على تكويننا البيولوجي. سنكتشف العيوب التي تشتمل عليها، وسنبحث في النظم البديلة التي يتمّ الدفاع عنها والتي تساعد على تجنّب الأخطاء الشائعة. سنتبع الانتقاء الطبيعي لأنظمتنا العددية وصولاً إلى طرق مسدودة وعلى طول مسارات متقاربة تتوازى مع تطوّر ثقافاتنا الإنسانية. وكما هو الحال مع التحيّزات الثقافية، سنكشف النقاب عن الفكر الرياضي المتأصّل بعمق في عقلنا الباطن بحيث لا ندرك حتّى كم يقيّد وجهات نظرنا.

المنزلة

يُعرف نظام الأرقام الحالي الذي نعتمده باسم «نظام قيمة المنازل العشرية». وترجع تسمية «قيمة المنزلة» إلى أنّ استعمال الرقم نفسه في موضع مختلف يمكن أن يمثّل قيمة عددية مختلفة. أمّا تسمية «عشري» فترجع إلى أنّ الرقم نفسه في الموضع المجاور يمثّل رقماً أكبر أو أصغر بعشر مرّات من جاره. ويُعرف عامل الضرب بين المنازل، أي 10، باسم القاعدة. أمّا سبب استخدامنا للرقم 10 كقاعدة بدلاً من قواعد أخرى فهو حادث بيولوجي أكثر من كونه خطّة مدروسة جيّداً. فمع أنّ بعض أسلافنا اختاروا قاعدة مختلفة، إلّا أنّ الغالبية العظمى من الثقافات التي طوّرت أنظمة رقمية (الأرمن، والمصريون، والإغريق، والرومان، والهنود، والصينيون، وغيرهم) اختارت القاعدة العشرية. والسبب ببساطة أنّنا عندما أدركنا حاجتنا إلى التعداد، قمنا باستخدام أصابعنا العشرة، بالطريقة نفسها التي نعلّم أطفالنا بها اليوم.

مع أنّ القاعدة 10 هي النظام الأكثر شيوعاً الذي اعتمده أسلافنا، إلّا أنّ بعض الثقافات اختارت قواعد أخرى تمّ إنشاؤها من جوانب مختلفة من نظامنا البيولوجي. فقد قام شعب يوكي الأصليون في كاليفورنيا بحساباتهم على أساس القاعدة 8 مستخدمين المسافات بين أصابعهم كعلامات، عوضاً عن استخدام الأصابع نفسها. واستخدم السومريون القاعدة 60، في إشارة إلى المفاصل الـ 12 للأصابع الأربعة في اليد اليمنى، واستخدموا الإبهام الأيمن كمؤشّر، وتتبّعوا العمليّة وصولاً إلى خمس مجموعات من 12 (60) مع الأصابع الخمسة لليد اليسرى. أمّا شعب أوكسابمين في بابوا غينيا الجديدة فاستخدموا نظاماً يرتكز على العدد 27: بدءاً من الإبهام في إحدى اليدين (1)، امتداداً إلى أعلى الذراعين، مع الأنف (14) وانتهاءً بخنصر اليد اليمنى (27). بالتالي، وفي حين أنّ الأصابع العشرة ليست بأيّ شكل من الأشكال أجزاء الجسم الوحيدة التي تُلهم النظام العددي، إلّا أنّها الأكثر بديهية، وبالتالي الأكثر شيوعاً بين أسلافنا عندما طوّروا الرياضيّات للمرّة الأولى.

بمجرّد أن تنشئ ثقافة ما نظاماً عددياً، فإنّها تفتح إمكانيّة تطوير رياضيّات عليا يمكن استخدامها لأغراض عمليّة. في الواقع، كان عديد من أقدم الحضارات الإنسانية ضليعاً في الرياضيّات المتطوّرة. فبحلول الألفيّة الثالثة قبل الميلاد، كان بإمكان المصريين، على سبيل المثال، الجمع والطرح والضرب واستخدام الكسور البسيطة. كما أدركوا تماماً الصيغة الخاصّة بحجم الهرم، وثمّة أدلّة على أنّهم عرفوا المثلّثات قائمة الزوايا ذات جوانب بطول 3 و4 و5، وهو ما يسمّى بالثلاثية الفيثاغورية، وذلك قبل زمن طويل من فيثاغورس. استخدم المصريون القاعدة المشتركة 10، لكن لم يكن لديهم نظام قيمة منازل. بدلاً من ذلك، كان لديهم هيروغليفية منفصلة

لمختلف قيم 10. ولم تكن تلك الإيضاحات المصوّرة للأرقام تكتفي بترتيب معيّن، بل كان المصريون يعرفون قيمة كلّ رقم بالنظر إلى الصورة. فكان الرقم واحد عبارة عن خطّ، ويشبه كثيراً الطريقة التي نكتبه بها اليوم. وكان الرقم 10 عبارة عن نير الماشية، و100 لفائف من الحبال، و1000 زنبقة ماء مزخرفة. وكان يعبَّر عن الرقم 10,000 بإصبع مَثنيّ، و100,000 بشرغوف، ومليون بالإله حِح، الذي يجسّد اللانهاية أو الخلود. وكان المليون أكبر رقم توصّل إليه المصريون القدماء. أمّا إذا أرادوا أن يكتبوا الرقم 1999، فكانوا يرسمون زنبقة ماء، وتسعة حبال ملفوفة، وتسعة أنيار، وتسعة خطوط عمودية. على الرغم من غرابة هذا النظام، إلّا أنّه خدمهم جيّداً بالنسبة إلى الأرقام دون المليار. ولكن، لو استطاع المصريون معرفة عدد النجوم في الكون (المقدّرة بنحو 1,000,000,000,000,000,000,000,000 في نظام قيمة المنازل العشرية) لتحتّم عليهم رسم الإله حِح مليار مليار مرّة، وهو أمر مستحيل عمليّاً.

كانت الحضارة الرومانية متقدّمة من نواح كثيرة على المصريين. فقد اشتُهر الرومان أنّهم نشروا على نطاق واسع اختراعات مثل الكتب، والخرسانة، والطرق، والسباكة الداخلية، ومفهوم الصحّة العامّة. بالمقابل، كان نظامهم العددي أكثر بدائية. فقد استخدموا نظاماً يتكوّن من سبعة رموز، I، V، X، L، C، D، وM لتمثيل الأرقام 1، و5، و10، و50، و100، و500، و1000 على التوالي. أدرك الرومان أنّ نظامهم الرقمي كان مرهقاً إلى حدّ ما، فحرصوا على كتابة الأرقام دوماً من اليسار إلى اليمين، ومن الأكبر إلى الأصغر، بحيث يمكن إضافة الأرقام إلى بعضها ببساطة. هكذا فإنّ MMXV مثلاً تعني 1000 + 1000 + 10 + 5 أو 2015.

بما أنّ كتابة الأرقام الطويلة لم تكن عملية، فقد تمّ إدخال استثناء للقاعدة. إذا وُجد رقم أصغر إلى يسار الرقم الأكبر، فهذا يعني أنّه يجب طرحه من الرقم الأكبر. على سبيل المثال، يُكتب الرقم 2019 بالشكل التالي MMXIX بدلاً من MMXVIIII، بحيث طُرح I من العدد X الأخير ليكون الحاصل 9، وتمّ بذلك توفير كتابة عدد من الأرقام. وإن لم يؤدّ ذلك إلى تعقيد الأمور كثيراً، فمن المحتمل أن يكون السبب أنّ القواعد والرموز الموحّدة للأرقام الرومانية كما نعرفها اليوم ليست هي نفسها التي استخدمها الرومان في أيّامهم. على سبيل المثال، قد يكون الأترووريون قد استخدموا رموزاً مثل I، وΛ، وX، و↑، وhttps://en.wikipedia.org/wiki/File:Etruscan_Numeral_100.svg، بدلاً من I، وV، وX، وL، وC، مع أنّه حتّى هذه الرموز هي موضع جدال. فمن المحتمل أن تكون الرموز والقواعد المنظّمة لكتابة الأرقام الرومانية الموصوفة أعلاه قد تطوّرت على مدى قرون عديدة في

أوروبا بعد الحقبة الرومانية. والأنظمة التي استخدمها الرومان الحقيقيون كانت على الأرجح أقلّ توحيداً.

مع ذلك، بعد انهيار الإمبراطورية الرومانية، لم تتعرّض الأرقام الرومانية للإبادة التي تعرّضت لها الهيروغليفية المصرية. واليوم، تزيّن الأرقام الرومانية العديد من المباني للإشارة إلى التاريخ الذي اكتمل بناؤها فيه، ممّا يسمح للمهندسين المعماريين بإضفاء جوّ من القدم على مشروع أُنجز مؤخّراً. لهذا السبب، شكّلت أواخر القرن التاسع عشر وقتاً عصيباً للغاية بالنسبة إلى البنّائين الحجريين. إذ تحمل مكتبة بوسطن العامّة النقش MDCCCLXXXVIII المكوّن من 13 حرفاً، وهو أطول رقم روماني في الألفيّة الأخيرة، ويشير إلى عام 1888 الذي اكتمل فيه البناء. وليس المهندسون المعماريون فقط هم الذين يشعرون أنّ كتابة العدد بالأرقام الرومانية يمنحها مزيداً من الجاذبية. فبحسب الموضة، يشير استخدام الأرقام الرومانية على ساعة اليد أنّ صاحبها أكثر أناقة ورقيّاً. كذلك فإنّ إليزابيث الثانية Elizabeth II، اسم الملكة البريطانية الأطول عهداً، لا يُقرأ على أنّه جزء من فيلم مثل إليزابيث 2. كما تستفيد الأفلام والبرامج التلفزيونية هي أيضاً من الأرقام الرومانية للإشارة إلى تاريخ إنتاجها، ولكن لأسباب مختلفة. ففي الأيّام الأولى للسينما، ونظراً لصعوبة قراءة الأرقام الرومانية بسرعة، منعت هذه الممارسة معظم الناس من الاستنتاج بسهولة أنّهم يشاهدون مادّة أعيد تدويرها، وسمحت بتلبية حقوق النشر في الوقت نفسه.

صحيح أنّه طال استعمال الأرقام الرومانية، إلّا أنّها لم تكتسح العالم لأنّ تعقيداتها الترميزية أعاقت على نحو ناشط تطوير رياضيّات عليا. في الواقع، تشتهر الإمبراطورية الرومانية بافتقارها إلى علماء رياضيّات بارزين ومساهمات في الرياضيّات. فكما رأينا، كلّ رقم في النظام الروماني هو معادلة يُحتمل أن تكون معقّدة وتوجّه القارئ إلى إضافة أو طرح سلسلة من الرموز للتوصّل إلى نتيجة. وهذا ما يجعل حتّى الإضافة البسيطة لاثنين من هذه الأرقام صعباً. فلم يكن ممكناً، على سبيل المثال، كتابة رقمين أحدهما فوق الآخر، وإضافة الأرقام في كلّ عمود، كما تعلّمنا جميعاً في دروس الرياضيّات الأولى. والرمزان المتماثلان في الموضع نفسه في رقمين رومانيين مختلفين لا يعنيان بالضرورة الشيء نفسه. إذ لا يمكن للمرء ببساطة طرح أرقام العدد MMXV من أرقام العدد MMXIX من اليمين إلى اليسار (X ناقص V تساوي 5، I ناقص X تساوي 9-، إلخ) لكي يكتشف أنّ الفارق بين 2019 و2015 هو أربع سنوات. والأهمّ من ذلك، افتقر الرومان إلى مفهوم نظام القيمة المنزلية أو الموضعيّة.

* * *

قبل الرومان والمصريين بزمن طويل، كان لشعب سومر، الواقع في العراق الحديث، نظام رقمي أكثر تطوّراً بكثير. فقد طوّر السومريون، الذين غالباً ما يشار إليهم أنّهم منشؤو الحضارة، مجموعة واسعة من التقنيات والأدوات للأغراض الزراعية، بما في ذلك أنظمة الريّ، والمحراث، لا بل وحتّى العجلة ربّما. ومع ازدهار مجتمعهم الزراعي، أصبح من الضروري، لأغراض بيروقراطية، قياس قطع الأرض بدقّة وتحديد الضرائب وتسجيلها. هكذا، ومنذ نحو خمسة آلاف سنة، ابتكر السومريون نظام قيمة المنزلة الأوّل، وهو نظام انتشرت مفاهيمه الأساسيّة في جميع أنحاء العالم لاحقاً. كُتبت الأعداد فيه بترتيب محدّد. فالرمز الواقع إلى اليسار يمثّل قيمة أكبر من ذاك الواقع إلى اليمين. وفي نظامنا المعاصر لقيمة المنزلة، نجد أنّه في الرقم 2019، يمثّل الرقم 9 تسعةَ آحاد، والرقم 1 عشرة واحدة، بينما يشير الرقم 0 إلى عدم وجود أيّ مئات، والرقم 2 إلى ألفين. وكلّما ابتعدنا نحو اليسار، مثّل الرقم نفسه عدداً أكبر بعشر مرّات. ومع أنّ السومريين اختاروا القاعدة 60، إلّا أنّهم استخدموا المبدأ نفسه تماماً. إذ يمثّل العمود في أقصى اليمين الآحاد، والعمود التالي إلى اليسار الستّينات، والعمود التالي 3600، وهكذا دواليك. وفي نظام السومريين الستّيني، يمثّل الرقم 2019 تسعة آحاد، 60 واحدة، صفر 3600، 216,000 اثنتين، ما يعادل في النظام العشري 432,069. بالمقابل، لو أراد السومريون كتابة عام 2019 في النظام الستّيني، سيبدو الرقم شبيهاً بـ 39 33، وفيه يمثّل الرمز 33 ثلاثاً وثلاثين ستّين (1980) ويمثّل الرمز 39 ما تبقّى من آحاد.

يمكن القول إنّ تطوير قيمة المنزلة هو أهمّ اكتشاف علمي على الإطلاق في كلّ الأزمان. وليس من قبيل المصادفة أن تعتمد أوروبا على نطاق واسع نظام قيمة المنازل العشرية الهندي العربي (وهو النظام الذي ما زلنا نستخدمه اليوم) في القرن الخامس عشر قبل وقت قصير من الثورة العلمية. فأنظمة القيمة المنزلية تتيح ترويض أيّ رقم، مهما كان حجمه، بعدد قليل من الرموز البسيطة. في النظامين المصري والروماني، لم يكن لموضع الرمز معنى عالمي. بدلاً من ذلك، تمّ تحديد القيمة بواسطة الرمز نفسه، الأمر الذي يعني أنّ كلتا الثقافتين تعثّرتا بالعدد المحدود من الأرقام الذي استطاعتا تمثيله بشكل معقول. بالمقابل، تمكّن السومريون من التعبير عن أيّ رقم شاؤوا بمجموعة رموزهم الـ 60. وسمح لهم نظامهم الموضعي المتطوّر بالقيام بحسابات متقدّمة مثل حلّ المعادلات التربيعية (التي تنشأ بشكل طبيعي في سياق زراعي عند تقسيم الأرض) وعلم المثلّثات.

وربّما كان السبب الرئيس وراء استخدام السومريين للنظام الستّيني أنّه سهّل بشكل كبير التعامل مع الكسور والقسمة. إذ تملك الستّون كثيراً من العوامل: الأعداد 1، و2، و3، و4، و5، و6، و10، و12، و15، و20، و30، و60 وكلّها تقسَّم على 60 بالضبط من دون بقيّة. لكنّ محاولة تقسيم باوند (مؤلّف من 100 بنس) أو دولار أو يورو (مؤلّف من 100 سنت) بين ستّة أشخاص سيسبّب خلافاً حول من سيحصل على البنسات أو السنتات الأربعة المتبقّية. بالمقابل، من الممكن تقسيم المينا السومرية، المؤلّفة من 60 شيكل، بدقّة بين شخصين أو 3، أو 4، أو 5، أو 6، أو 10، أو 12، أو 15، أو 20 أو حتّى 30 من دون التسبّب بشجار. وباستخدام القاعدة السومرية 60، يصبح من السهل علينا أيضاً قياس وتقسيم كعكة بشكل متساوٍ تماماً، على سبيل المثال، بين 12 شخصاً. فواحد على 12 في نظام قيمة المنازل الستّينية يعادل فقط خمسة على ستّين. وكانوا يكتبون هذا الرقم بدقّة 0.5، مقابل الرقم المعقّد ...0.083333 (ثمانية من مائة، ثلاثة من ألف، ثلاثة من عشرة آلاف، إلخ) في نظام قيمة المنازل العشرية الذي نعتمده. لهذا السبب، وتماماً مثل الكعكة الدائرية، قسّم علماء الفلك السومريون قوس سماء الليل إلى 360 (أي 6 × 60) درجة، ممّا ساعدهم على القيام بالتوقّعات الفلكية.

استند اليونانيون القدماء إلى التقليد السومري، وقسّموا كلّ درجة إلى 60 دقيقة (رمزها I) وكلّ دقيقة إلى 60 ثانية (رمزها II). في الواقع، تعني كلمة «دقيقة» الجزء الصغير جدّاً (في هذه الحالة، من الدائرة)، وتشير كلمة «ثانية» إلى المستوى الثاني من تقسيم الدرجة. ولا يزال نظام قيمة المنازل الستّينية مستعملاً في علم الفلك اليوم ويسمح للفلكيين بالتقاط حجم الأشياء التي تختلف كثيراً في سماء الليل. أمّا النظام الدائري للدرجات، كما هو الحال في °360، الذي يُستخدم الآن أيضاً لقياس الحرارة، وبسبب ارتباطاته الفلكية، فيُعتقد أنّه كان يرمز أساساً إلى الشمس. لكن على صعيد أقلّ رومانسية (وأكثر ارتباطاً بالرياضيّات)، من المحتمل أنّه كان من الطبيعي استخدام الحرف الزائد 0 للدرجات بعد استخدام I وII في التقسيمات الفرعية للدقائق والثواني، لتكتمل السلسلة 0، وI، وII.

الوقت

قد نكون أقلّ دراية بالدقائق والثواني المستخدمة في علم الفلك، إلّا أنّه ثمّة نظام ستّيني معروف على نطاق أوسع بكثير، يحكم إيقاعات حياتنا اليومية، ألا وهو الوقت. فمنذ اللحظة التي نستيقظ فيها وحتّى لحظة استسلامنا للنوم، وسواء كنّا نعرف ذلك أم لا، فإنّنا نفكّر كثيراً بحسب

النظام الستّيني. وليس من قبيل المصادفة أن يتمّ تقسيم الساعات، وهي الأقسام الزمنية لأيّامنا الدورية، إلى 60 دقيقة، وكلّ دقيقة إلى 60 ثانية.

أمّا الساعات نفسها، فتمّ تجميعها في مجموعات من 12 ساعة. على الرغم من استخدام الأساس 10 في البداية، كان المصريون القدماء هم الذين قسّموا اليوم إلى 24 جزءاً: 12 ساعة نهارية و12 ساعة ليلية، في محاكاة لعدد الأشهر في التقويم الشمسي. خلال النهار، تمّ تسجيل الوقت باستخدام ساعات شمسية ذات 10 أقسام. وأضيفت ساعتان من الشفق، واحدة عند طرفَي النهار، للفترات التي لا يكون الظلام قد خيّم فيها بعد، ولكنّ الساعة الشمسية لا تفيد فيها. وتمّ تقسيم الليل بشكل مماثل إلى 12 ساعة، استناداً على صعود نجوم معيّنة في سماء الليل.

بما أنّ المصريين حدّدوا 12 ساعة لكلّ نهار، فقد تغيّر طول ساعاتهم على مدار العام مع تغيّر مدّة النهار عبر الفصول: أطول في الصيف وأقصر في الشتاء. بالمقابل، أدرك اليونانيون القدماء أنّه لإحراز تقدّم كبير في حساباتهم الفلكية، فإنّه من الضروري تقسيم الوقت إلى شرائح متساوية. لذلك أدخلوا فكرة تقسيم اليوم إلى 24 ساعة متساوية الطول. غير أنّ هذه الفكرة لم تنتشر إلّا مع ظهور الساعات الميكانيكية الأولى في أوروبا في القرن الرابع عشر. وبحلول أوائل القرن التاسع عشر، كانت الساعات الميكانيكية الموثوقة واسعة الانتشار. وباتت معظم المدن في أوروبا تقسّم يومها إلى مجموعتين من اثنتي عشرة ساعة متساوية.

لا تزال تقسيمات اليوم إلى فترتين مدّة كلّ منهما 12 ساعة قياسية منتشرة في معظم أنحاء العالم الناطق باللغة الإنكليزية. ومع ذلك، تستخدم معظم الدول توقيت الـ 24 ساعة، الذي يميّز مثلاً بين الساعة 8 صباحاً (08:00) والساعة 8 مساءً (20:00) بأرقام تفصل بينها 12 ساعة. لكنّ الولايات المتّحدة، والمكسيك، والمملكة المتّحدة، ومعظم دول الكومنولث (أستراليا، وكندا، والهند، إلخ) ما زالت تستخدم الاختصارين AM (صباحاً) وPM (مساءً) للتمييز بين الساعة 8:00 صباحاً والساعة 8:00 مساءً. ومن المعروف أنّ هذا التمييز سبّب مشاكل أحياناً، لا سيّما بالنسبة إليّ.

عندما كنت طالب دراسات عليا، أتيحت لي الفرصة لزيارة زملاء في جامعة برينستون. أنا من الأشخاص الذين يسبّب لهم السفر بعض التوتّر، وهو أمر ورثته من والدي. ففي كلّ مرّة أنطلق فيها من المنزل في رحلة دولية، يتناهى إليّ صوته وهو يعدّد بصوت قلق: «المال، التذاكر، جوازات السفر». وبنفس الطريقة تقريباً، ما زلت أتذكّر معادلة فيثاغورس: «مربع الوتر (الضلع المقابل للزاوية القائمة) يساوي مجموع مربعَي الضلعَين الآخرين» باللهجة الإيرلندية التي يتحدّث بها أستاذ الرياضيات في مدرستي الثانوية، السيّد ريد.

ولا عجب أنّني خلال رحلتي من مطار هيثرو، وصلت قبل أربع ساعات من توقيت رحلتي. فصادفت مشرفي الأكثر استرخاءً وخبرة، الذي كان يستقلّ طائرة في وقت أبكر بقليل، بعد أكثر من ساعتين ونصف. كانت زيارتي الأكاديمية مثمرة، لكنّ رهاب السفر جعلني أقطع رحلتي لمشاهدة معالم مدينة نيويورك في آخر يوم لي في الولايات المتّحدة حرصاً على العودة إلى برينستون في وقت يسمح لي بالحصول على قسط وافٍ من النوم ليلاً. في ذلك المساء، بعد أن حزمت حقائبي، وتأكّدت من أنّني لم أنس شيئاً في الغرفة، كما اطمأننت إلى وجود المال، والتذاكر، والجوازات عدّة مرّات، ضبطتُ المنبّه على الساعة الرابعة صباحاً لأضمن عدم تأخّري على موعد الرحلة المحدّدة عند الساعة 9:00.

استيقظت عند الساعة الرابعة صباحاً، واستقلّيت قطاراً من برينستون. وصلت إلى مطار نيوارك الدولي بعد ساعتين ونصف. لكن عندما بحثت عن رحلتي على لوحة المغادرة، لم أستطع إيجادها. بحثت مراراً وتكراراً، لكنّ القائمة انتقلت مباشرةً من رحلة الساعة 8:59 إلى سانت لوسيا إلى رحلة الساعة 9:01 إلى جاكسونفيل. ذهبت إلى مكتب الاستعلامات، وسألت السيّدة الجالسة خلفه عن الرحلة. فأجابت، «أخشى أنّ الرحلة الوحيدة الذاهبة إلى لندن اليوم تغادر هذا المساء، سيّدي». لم أصدّق ذلك، كيف ارتكبت هذا الخطأ؟ كنت شديد الحذر في استعداداتي، لكن يبدو أنّني أغفلت حقيقة أنّ الرحلة التي ظننت أنّني سألتحق بها لا وجود لها أساساً. ثمّ فهمت السبب. سألت المساعدة عن وقت الرحلة التي ستغادر هذا المساء فأجابت، «موعدها عند الساعة 9 مساءً، سيّدي».

لقد خلطت بين التوقيت الصباحي والمسائي، وهو خطأ ما كان ليحدث في نظام الـ 24 ساعة. لحسن الحظّ، فقد أخطأت في الاتّجاه الصحيح. وكان عقابي الانتظار لمدّة 14 ساعة للصعود على متن الطائرة، غير أنّ الإنترنت تزخر بقصص عن أشخاص ارتكبوا هذا الخطأ في الاتّجاه المعاكس، وفوّتوا تماماً رحلتهم بفارق 12 ساعة، واضطرّوا إلى شراء تذكرة جديدة. ولا حاجة للقول إنّ هذه التجربة لم تسهم كثيراً في التخفيف من القلق الذي ينتابني عند السفر.

أجد من الصعب بما فيه الكفاية الوصول إلى المطار في الوقت المحدّد في القرن الحادي والعشرين، لكن تخيّلوا مدى صعوبة السفر لمسافات طويلة مع نظام الوقت المشوّش وغير المتزامن لأوائل القرن التاسع عشر. فبحلول عشرينيات القرن التاسع عشر، وعلى الرغم من أنّ معظم الدول الأوروبية كانت قد قسّمت يومها إلى 24 ساعة متساوية، إلّا أنّ مقارنة الوقت بين البلدان كانت صعبة للغاية، لا بل غير مجدية تقريباً. ذلك أنّ قلّة من الدول تمكّنت من فرض توقيت واحد عبر

كامل الأراضي الخاضعة لسلطتها، فما بالك بالتنسيق مع جيرانها. هكذا، كان من شأن بريستول، الواقعة في غرب المملكة المتّحدة، أن تكون متأخّرة عن باريس بمقدار 20 دقيقة، في حين أنّ لندن تجد نفسها متقدّمة على نانت الواقعة في غرب فرنسا بستّ دقائق. وكان سبب التناقضات يرجع عادةً إلى أنّ كلّ مدينة تستخدم توقيتاً محلّياً مستنداً إلى موقع الشمس في السماء. وبما أنّ أوكسفورد تقع على بعد درجة وربع غرب لندن، فإنّ الشمس تكون في ذروتها هناك بعد خمس دقائق تقريباً، متخلّفةً بالتوقيت المحلّي لأوكسفورد عن لندن بخمس دقائق. وتعني الساعات الأربع والعشرون التي تقابل دورةً من 360 درجة للأرض على محورها أنّ كلّ درجة طولية تعادل أربع دقائق من الوقت. بالتالي فإنّ بريستول، الواقعة على بعد درجتان ونصف غرب لندن، متأخّرة زمنياً عن أوكسفورد بمقدار خمس دقائق.

في نهاية المطاف، كانت المشاكل التي طرحها التوقيت المحلّي للسفر لمسافات طويلة على شبكة السكك الحديدية المزدهرة هي التي أدّت إلى تنسيق التوقيت في جميع أنحاء المملكة المتّحدة. فقد أدّى استخدام التوقيت المحلّي في مدن مختلفة من المملكة المتّحدة إلى حالة من الفوضى الزمنية، والعديد من حالات تفويت المواعيد نتيجة الارتباك بين السائقين وعمّال الإشارات. وفي عام 1840، اعتمد خطّ سكّة الحديد الغربي العظيم توقيت غرينتش عبر شبكته. وتبعتها المدن الصناعية في مدينتي ليفربول ومانشستر الصناعيتين في عام 1846. ومع ظهور التلغراف، أصبح من الممكن أن ينتقل التوقيت عبر جميع أنحاء البلاد على الفور تقريباً من المرصد الملكي في غرينتش، ممّا سمح للمدن بمزامنة ساعاتها. لكن على الرغم من أنّ الغالبية العظمى من البلدان سرعان ما التحقت بتوقيت سكّة الحديد، إلّا أنّ بعض المدن، لا سيّما تلك التي تتمتّع بتقاليد دينية قوية، رفضت التخلّي عن توقيتها الشمسي «الذي وهبها إيّاه الله» لصالح البراغماتية التي تفرضها سكك الحديد. ولم تلحق غالبية المتعصّبين للتوقيت الشمسي أخيراً بالركب إلّا في عام 1880، عندما أقرّ البرلمان البريطاني التشريع أخيراً. مع ذلك، لا تزال أجراس برج توم تاور في كنيسة كريست، وهي الكلّية التأسيسية لجامعة أكسفورد، تُقرع بعد خمس دقائق من تمام الساعة.

سرعان ما تبعت كلّ من إيطاليا، وفرنسا، وإيرلندا، وألمانيا في تبنّي توقيت موحّد في جميع أنحاء بلدانها، بحيث تقدّمت باريس بفارق تسع دقائق عن توقيت غرينتش، بينما تأخّرت دبلن بفارق 25 دقيقة. لكنّ الوضع لم يكن بهذه البساطة في الولايات المتّحدة. ذلك أنّ اتّباع توقيت واحد عبر 58 درجة طولية في البرّ الرئيس للولايات المتّحدة لن يكون عملياً بالنسبة إلى المناطق التي تفصل بينها أربع ساعات شمسية. ففي فصل الشتاء، عندما تغرب الشمس في ولاية ماين، لا يكون الوقت قد

تجاوز ساعة الغداء في ولاية واشنطن. من الواضح أنّ للتوقيت المحلّي دور يؤدّيه، لكن في منتصف القرن التاسع عشر كان الوضع سيّئاً، إذ تمسّكت كلّ مدينة كبرى بتوقيتها المحلّي. بالنتيجة، كان لمعظم شركات سكك الحديد التي تعمل عبر نيو إنغلاند في عام 1850 توقيتها الخاصّ بها، والذي يستند عموماً إلى موقع مكاتبها الرئيسة أو إحدى محطّاتها الأكثر شعبية. وفي بعض التقاطعات المزدحمة، تمّ اعتماد ما يصل إلى خمس تواقيت مختلفة. ويُعتقد أنّ الإرباك الناجم عن هذا الافتقار إلى التوحيد قد ساهم في وقوع العديد من الحوادث. لكن بعد حادث مثير للقلق وقع في عام 1853 وأدّى إلى وفاة 14 راكباً، وُضعت خطط لتوحيد توقيت السكك الحديدية في نيو إنغلاند. في ذلك الوقت، اقتُرح تقسيم الولايات المتّحدة بأكملها إلى سلسلة من المناطق الزمنية، بحيث تتأخّر كلّ منطقة ساعة عن المنطقة التالية امتداداً من الشرق إلى الغرب. وفي 18 نوفمبر من عام 1883، المعروف لدى كثيرين في أنحاء البلاد باسم «يوم الظهيرتين»، تمّت إعادة ضبط ساعات المحطّات في جميع أنحاء القارّة. وقُسّمت الولايات المتّحدة إلى خمس مناطق زمنية: المنطقة الزمنية بين الأقاليم، المنطقة الشرقية، المنطقة الوسطى، المنطقة الجبلية، والمنطقة الغربية.

استناداً إلى التقسيمات الفرعية للولايات المتّحدة، اقترح الكندي السير ساندفورد فليمينغ في أكتوبر عام 1884، في مؤتمر ميريديان الدولي في واشنطن العاصمة، تقسيم الأرض بأكملها إلى سلسلة من 24 منطقة زمنية، وإنشاء ساعة موحّدة عالمياً. تمّ تقسيم العالم بواسطة 24 خطّاً وهمياً، تُعرف باسم خطوط الطول، وتمتدّ من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي. ويبدأ اليوم عالمياً عند منتصف الليل في خطّ الطول الرئيس في غرينتش. بحلول عام 1900، أصبح كلّ مكان في العالم تقريباً جزءاً من منطقة زمنية معيارية، لكن لم تبدأ جميع البلدان بقياس توقيتها بالرجوع إلى خط الطول الرئيس حتّى عام 1986، عندما ضبطت النيبال أخيراً ساعاتها قبل توقيت غرينتش بخمس ساعات و45 دقيقة. بوجود المناطق الزمنية التي تفصل في ما بينها ساعة من الزمن، تم توفير قدر كبير من المتاعب والإرباك، وأصبح من الأسهل بكثير تحديد الجداول الزمنية والتجارة بين البلدان المجاورة. مع ذلك، فإنّ استخدام المناطق الزمنية لم يقض تماماً على الالتباس. فعند ارتكاب الأخطاء الآن، لا تتأخّر الحسابات الزمنية بضع دقائق وحسب، بل قد تصل إلى ساعة في بعض الأحيان، وهو تأخير يُحتمل أن يتسبّب بكارثة.

* * *

كقائد لحركة 26 يوليو، أطاح فيدل كاسترو، مع شقيقه راؤول ورفيقه تشي غيفارا، بالدكتاتور الكوبي المدعوم من الولايات المتّحدة، فولغينسيو باتيستا، في عام 1959. وبناءً على

الفلسفة الماركسية اللينينية، سرعان ما حوّل كاسترو كوبا إلى دولة حزب واحد، وأمّم الصناعات والشركات كجزء من الإصلاحات الاجتماعية الشاملة. لم تستطع حكومة الولايات المتّحدة الإبقاء على دولة شيوعية متعاطفة مع الاتّحاد السوفياتي على عتبة بابها. وبحلول عام 1961، مع اقتراب الحرب الباردة من ذروتها، وضع التسلسل الهرمي الأميركي خطّة للإطاحة بكاسترو. خوفاً من الانتقام السوفياتي في برلين، أصرّ الرئيس الأميركي، جون ف. كينيدي، على ألاّ تظهر أيّ علاقة للولايات المتّحدة بالانقلاب. من أجل ذلك، تمّ تدريب مجموعة مؤلّفة من أكثر من 1000 منشقّ كوبي، عُرفت باسم اللواء 2506، على الغزو في معسكرات سرّية في غواتيمالا. كما تمركزت عشر قاذفات أميركية من طراز B26 (وهو نوع الطائرات الذي سلّحت به الولايات المتّحدة سلف كاسترو) في نيكاراغوا المجاورة للمساعدة في الغزو. وفي 17 أبريل، شنّ اللواء المنفيّ غزواً برّياً على خليج الخنازير، على الساحل الجنوبي لكوبا. كان الهدف من ذلك إشعال ثورة على أمل أن تتبنّى أعداد هائلة من المواطنين الكوبيين المضطهدين قضيّة المنفيين.

واجهت الخطّة المشاكل حتّى قبل وضعها قيد التنفيذ. ففي السابع من أبريل، أي قبل عشرة أيّام كاملة من الهجوم المرتقب، بلغ خبر الخطط صحيفة *نيويورك تايمز* التي نشرت على صفحتها الأولى مقالة تدّعي فيها أنّ الولايات المتّحدة تدرّب المنشقّين المعارضين لكاسترو. تنبّه كاسترو إلى احتمال الغزو، فاتّخذ احتياطات صارمة، وسجن المعارضين المعروفين الذين يحتمل أن يساعدوا في الانتفاضة، كما جهّز جيشه. مع ذلك، في يوم السبت الواقع في 15 أبريل، أي قبل الغزو بيومين، انطلقت طائرات أميركية من نوع B26 إلى كوبا في محاولة لتدمير سلاح الجوّ التابع لكاسترو. مُنيت المهمّة بفشل كامل تقريباً، ولم تدمِّر سوى عدد قليل جدّاً من طائرات كاسترو التشغيلية، وخسرت على الأقلّ طائرة واحدة من نوع B26 في البحر شمال كوبا نتيجة تعرّضها للقصف.

كان للمهمّة الفاشلة تأثير إضافي تمثّل في إرسال وزير الخارجية الكوبي راؤول روا إلى الأمم المتّحدة. وفي جلسة طارئة للجمعيّة العامّة، ادّعى روا أنّ الولايات المتّحدة قصفت كوبا، وهو أمر صحيح. ومع تركّز أضواء العالم على هذه القضيّة، رفض كينيدي المجازفة بتقديم مزيد من الأدلّة على تورّط الولايات المتّحدة، فألغى الغارة الجوّية المخطّط لها في صباح السادس عشر من ذلك الشهر لمساعدة المنفيين على المغادرة.

بما أنّ اللواء 2506 كان مؤلّفاً بالكامل من المنشقّين الكوبيين، من دون صلة واضحة بالولايات المتّحدة، فقد استطاع كينيدي إنكار أيّ علاقة بأعمالهم. وفي صباح 17 أبريل، وافق على إنزالهم على شواطئ خليج الخنازير. فتصدّى لهم 20 ألف جندي كوبي مجهّزين بشكل جيّد. رفض

كينيدي إصدار أوامر لقصف جيش كاسترو أو إرسال طائرات للمساعدة من الجوّ، خوفاً من الانتقام الدولي مرّة أخرى. بحلول مساء 18 أبريل، كان المنشقّون في وضع حرج. وفي محاولة إنقاذ أخيرة، أصدر كينيدي أمراً لطائرات B26 بقصف الجيش الكوبي. كان من المخطّط أن تتمّ حماية القاذفات بطائرات من حاملة الطائرات الأميركية الواقعة فوق الأفق شرق كوبا. وحُدّد موعد الضربة الجوّية عند الساعة 06:30 من صبيحة يوم 19 أبريل.

مع اقتراب الموعد، انطلقت الطائرات لملاقاة قاذفات B26، لتجد أنّها لم تصل. في الواقع، وصلت طائرات B26، العاملة بحسب التوقيت المركزي لنيكاراغوا، بعد ساعة كاملة، أي عند الساعة 07:30 بحسب التوقيت الشرقي لكوبا. ومع غياب الدعم الجوّي الذي تخلّى عن المهمّة منذ فترة طويلة، تمكّنت طائرات كاسترو من إسقاط قاذفتين من طراز B26 تحملان شارة أميركية، ممّا يُثبت بدون أدنى شكّ تورّط الولايات المتّحدة في محاولة الانقلاب. كانت التداعيات السياسية للخطأ البسيط في المنطقة الزمنية هائلة، إذ دفعت كوبا بقوّة إلى أحضان السوفيات وعجّلت بأزمة الصواريخ الكوبية بعد عام من ذلك.

النظام الاثني عشري

يُعزى فشل غزو خليج الخنازير، جزئيّاً، إلى تقسيم اليوم، وبالتالي العالم، إلى مجموعتين من مناطق زمنية مدّتها 12 ساعة. مع ذلك، ما كان لهذا الخطأ أن يكون أقلّ كارثية لو أنّ الأرض مقسّمة على أساس مختلف. فسواء مع 60 أو حتّى مع مجرّد 10 أجزاء، ستبقى المنطقة الزمنية لنيكاراغوا متأخّرة عن كوبا بالمقدار نفسه من الوقت. في الواقع، ثمّة كثير من الأشخاص الذين يعتقدون أنّ النظام «الاثني عشري» متفوّق على نظامنا العشري السائد. فكلّ من جمعيّة بريطانيا العظمى للنظام الاثني عشري وجمعيّة أميركا للنظام الاثني العشري تجادلان أنّ العوامل الستّة للنظام الاثني عشري، 1 و2 و3 و4 و6 و12، مقارنة بالعوامل الأربعة فقط للنظام العشري (1 و2 و5 و10) تمنحه ميزة، وأعتقد أنّهم محقّون.

علّمني وَلداي، من خلال تجربة مؤلمة، أنّه من المهمّ تقسيم الأشياء بالتساوي. وأنا متأكّد أنّهما يفضّلان حصول كلّ منهما على قطعة حلوى واحدة عوضاً عن حصول أحدهما على خمسة والآخر على ستّة. فعندما توقّفنا عند محطّة خدمة في طريقنا إلى منزل جدّيهما، اشتريتُ كيساً من السكاكر، وأعطيتهما إيّاه ليتقاسماه. غير أنّني لم أكن أعرف أنّ الكيس يحتوي على 11 قطعة من

السكاكر، وأنّني أعطيتهما رقماً مفرداً ليتقاسمانه. والشجار الذي دمغ بقيّة تلك الرحلة الطويلة شمالاً جعلني أحرص الآن على شراء أعداد متساوية من السكاكر. في الواقع، لديّ أصدقاء يملكون ثلاثة أطفال، ولا يشترون من الحلويات سوى ما يمكن تقسيمه على ثلاثة. ولو كنتَ صانعاً لهذه المنتجات التي تركّز على الأطفال، فبوسعك زيادة زبائنك إلى الحدّ الأقصى وتقليل احتمال وقوع أيّ شجار بين الإخوة من خلال البيع بمجموعات من 12، لكي تناسب الأسر المكوّنة من 1 أو 2 أو 3 أو 4 أو 6 أو حتّى من 12 طفلاً. كذلك، في المرّة التالية التي تقسّم فيها شيئاً ما، وترغب في حصول كلّ شخص على المقدار نفسه (تقطيع كعكة في حفلة للأطفال مثلاً)، فإنّ تقسيمها إلى 12 قطعة، سيمنحك مرونة أكبر في عدد الأشخاص الذين يمكنك استيعابهم بشكل منصف. مع ذلك، وحتّى من دون مشكلة عدد السكاكر أو قطع الحلوى، أنا واثق أنّ الأولاد سيتمكّنون من إيجاد شيء آخر يتشاجرون حوله.

يرجع السبب الرئيس لتفضيل الاثني عشرية على العشرية أنّه، تماماً كما هو الحال مع الأساس 60 الذي اعتمده السومريون، فإنّ عدداً أكبر من الكسور يمتاز بتمثيل مغلق «لطيف» مع الأساس 12 منه مع الأساس 10. على سبيل المثال، في النظام العشري، تُمثَّل 1/ 3 بالرقم العشري اللانهائي ...0.33333، في حين أنّه في النظام الاثني عشري، من الممكن أحياناً حسابها ببساطة على أنّها أربعة من اثني عشر وتُكتب 0.4. لكن ما أهمّية ذلك؟ في الواقع، من شأن عدم وجود تمثيل دقيق لرقم معيّن أن يُحدث فرقاً عند إجراء قياسات متكرّرة. فلنأخذ مثالاً على ذلك متراً من الخشب نريد تقسيمه إلى ثلاث قطع متساوية لصنع أرجل لمقعد منخفض. باستخدام المسطرة العشرية، نقدّر الثلث الأوّل بطول 33 سم والثاني بطول 33 سم، لكن يتبقّى 34 سم للثلث الأخير. فيكون المقعد بأرجله غير المتساوية غير مريح للجالس عليه. أمّا مع مسطرة اثني عشرية، فإنّ الثلث، أو ما يعادل 4 من 12 للمتر سيشكّل علامة دقيقة تتيح تقسيم قطعة الخشب إلى ثلاثة أرجل متساوية تماماً.

يزعم دعاة النظام الاثني عشري أنّه سيقلّل من ضرورة تدوير الأرقام وبالتالي تخفيف عدد المشاكل الشائعة. وهم على حقّ إلى حدّ ما. فمع أنّ المقعد المتقلقل لا يعدّ مشكلة كبيرة، إلّا أنّ أخطاء التدوير البسيطة الناتجة عن الاضطرار إلى تشذيب تمثيل الأعداد في نظامنا العشري الحالي يمكن أن يكون لها آثار أكثر خطورة.

على سبيل المثال، أدّى خطأ تدوير بسيط في الانتخابات الألمانية في عام 1992 إلى حرمان زعيم الحزب الاشتراكي الديمقراطي المنتصر تقريباً من الحصول على مقعد في البرلمان، عندما أُعلن أنّ حصّة الحزب الأخضر في التصويت تبلغ 5.0% بدلاً من 4.97% [114]. وفي سياق مختلف تماماً، في عام 1982، انخفض مؤشّر بورصة فانكوفر الذي تمّ إنشاؤه حديثاً بشكل مستمرّ على

مدى عامين تقريباً، على الرغم من أداء السوق المائل إلى الارتفاع[115]. وتبيّن أنّه في كلّ مرّة تُعقد فيها صفقة، يتمّ تدوير قيمة المؤشّر من خلال خفضه ثلاث منازل عشرية، ممّا أدّى إلى خفض قيمة المؤشّر باستمرار. ومع 3000 صفقة في اليوم، كان المؤشّر يخسر نحو 20 نقطة في الشهر، ممّا قوّض ثقة السوق.

المسطرة الإمبراطورية

على الرغم من أنّ النظام الاثني عشري يميل إلى الحدّ من الأخطاء المرتبطة بالتدوير، إلّا أنّه من غير المرجّح أن تعتمده دولة صناعية في وقت قريب بسبب الإرباك الذي قد ينتج عنه. مع ذلك، استخدم عديد من الدول الصناعية في الماضي على نطاق واسع أنظمة القياس الإمبراطورية، التي تعتمد بشكل كبير على القاعدة 12. فالقدم تشتمل على 12 إنشاً، والإنش على 12 خطّاً. في الأصل، كان الباوند الإمبراطوري يشتمل أيضاً على 12 أوقية. وكلمة أوقية (أو أونصة) مشتقّة من نفس الكلمة اللاتينية التي اشتُقّت منها كلمة إنش، uncia، التي تعني جزءاً من 12. في الواقع، ما زال نظام تروي الإمبراطوري، المستخدم لقياس المعادن النفيسة والأحجار الكريمة، يقسم الباوند إلى 12 أونصة تروي. ويتألّف الباوند النقدي البريطاني القديم من 20 شلن، يتكوّن كلّ منها من 12 بنساً. هذا يعني أنّه يمكن تقسيم الباوند المكوّن من 240 بنساً بالتساوي في 20 طريقة مختلفة.

على الرغم من أنّ النظام الإمبراطوري يشتمل على بعض المزايا الملحوظة (أكثرها شيوعاً إجبار الأطفال على حفظ جداول الضرب الغامضة!)، إلّا أنّ عدم انتظامه (16 أوقية للباوند (رطل)، 14 باوند للسْتون، 11 ذراع للقصبة، 4 بذور خشخاش لحبّة الشعير، إلخ) أدّى إلى التخلّي عنه على نطاق واسع لصالح النظام المتري العشري. ولا تزال الولايات المتّحدة اليوم، بالإضافة إلى ليبيريا وميانمار، واحدة من ثلاث دول فقط في العالم لا تستخدم النظام المتري على نطاق واسع. تحاول ميانمار حالياً التحوّل إلى النظام المتري. غير أنّ عدم توافق الولايات المتّحدة يعتمد إلى حدّ كبير على التشكّك والعناد التقليدي من جانب الكثير من مواطنيها. ففي إحدى حلقات *سلسلة The Simpsons*، التي غالباً ما تشكّل نافذة على الحياة الأميركية المعاصرة، يدّعي الجدّ سيمبسون أنّ «النظام المتري أداة شرّ. سيّارتي تسير 40 قصبة بالبرميل، وأنا مرتاح هكذا».

بدأت المملكة المتّحدة انتقالها إلى النظام المتري عام 1965، وهي الآن دولة مترية اسمياً. مع ذلك، لم تتخلَّ المملكة المتّحدة مطلقاً عن القياسات الإمبراطورية التي كانت معتمدة في الماضي. فهي ما زالت تتمسّك بقوّة بالأميال، والأقدام، والإنشات المستخدمة لقياس الارتفاع والمسافة،

والباينت (نصف لتر للحليب والسوائل)، والسْتون، والباوند (الرطل)، والأوقية المستعملة على ألسنة العامّة لقياس الأوزان. وفي فبراير من عام 2017، اقترحت وزيرة الأغذية والشؤون الريفية في المملكة المتّحدة، والتي كانت مرشّحة لقيادة حزب المحافظين سابقاً، أندريا ليدسوم، أن يُسمح للمصنّعين البريطانيين ببيع السلع باستخدام النظام الإمبراطوري القديم بعد الانفصال عن الاتّحاد الأوروبي. لكن على الرغم من جاذبية تلك الفكرة لأقلّية صغيرة من أمثال الجدّ سيمبسون التي غلبها الحنين إلى «عصر ذهبي» بائد، فإنّ العودة إلى النظام الإمبراطوري ستعزل المملكة المتّحدة بالكامل تقريباً على صعيد التجارة الدولية. فعلى غرار نظام الأعداد الاثني عشري، سيكون تطبيقه باهظ التكلفة على صعيد المال والوقت، بالإضافة إلى أنّه سيخلّف جبالاً من البيروقراطية التي لا داعي لها. والبيروقراطية والتكلفة، بالإضافة إلى تمنّع الناس الذين يعيشون في البلدان القليلة المتبقّية التي لا تتّبع النظام المتري، هي أيضاً الأسباب الرئيسة لعدم اعتماد النظام المتري عالمياً بعد. لكن بينما تظلّ الولايات المتّحدة آخر دولة صناعية تستخدم الوحدات الإمبراطورية[116] في كلّ أرجائها تقريباً، إلّا أنّها ستستمرّ بمواجهة ظروف تجد نفسها فيها تائهة في الترجمة.

* * *

في 11 ديسمبر 1998، أطلقت الناسا مكّوك مارس كلايمت أوربيتر البالغة كلفته 125 مليون دولار، وهو عبارة عن روبوت مصمّم للبحث في مناخ المرّيخ وتأدية دور نقطة اتّصال بمارس بولار لاندر. على عكس بولار لاندر، لم يكن المكّوك مصمّماً على الإطلاق للوصول إلى سطح المرّيخ. في الواقع، كان من شأن اقترابه لأكثر من 85 كم أن يتسبّب بتفتّته. في 15 سبتمبر من عام 1999، بعد التفاوض بنجاح على رحلة المكّوك التي ستستمرّ لتسعة أشهر عبر النظام الشمسي، تمّ إطلاق سلسلة من المناورات النهائية لجلب المكّوك الفضائي إلى ارتفاع مثالي يقارب 140 كم فوق سطح المرّيخ. وفي صباح 23 سبتمبر، أطلق المكّوك الفضائي أسطوانة الضغط الرئيسة ثمّ اختفى عن الأنظار خلف الكوكب الأحمر، وذلك قبل 49 ثانية من الوقت المتوقّع، ولم يعد للظهور مجدّداً. خلصت لجنة التحقيق بعد الحادث إلى أنّ المكّوك الفضائي كان على مسار غير صحيح من الممكن أن يصل به إلى مسافة 57 كم من السطح، وهي مسافة منخفضة بدرجة كافية ليتمكّن الغلاف الجوي من تدمير المسبار الهشّ. وعندما حقّق المجلس في سبب هذا التباين، اكتشف أنّ برنامجاً تمّ توفيره من قبل شركة لوكهيد مارتن، المتعاقدة مع الولايات المتّحدة في مجال الفضاء والدفاع، كان يرسل بيانات حول أسطوانة الضغط بالوحدات الإمبراطورية. وبالطبع، كانت الناسا، التي تعدّ واحدة من أهمّ المؤسّسات العلمية في العالم، تتوقّع هذه القياسات بوحدات القياس الدولية

المعتمدة. أدّى الخطأ إلى إطلاق المكّوك لإسطوانات الضغط بقوّة شديدة، ليتحوّل بالتالي إلى مجرّد 338 كيلوغراماً (أو إذا كنتم تفضّلون 745 رطلاً) من النفايات الفضائية مع انهياره في أعماق الغلاف الجوّي للمرّيخ.

* * *

بعد أن أدركت كندا أنّ معظم العالم قد تحوّل إلى النظام المتري، وتوقّعت أنواع الأخطاء التي ستقع فيها الناسا، قرّرت الانتقال إلى النظام المتري في عام 1970. وبحلول منتصف سبعينيات القرن العشرين، أصبحت ملصقات المنتجات تعرض المعلومات بالوحدات المترية، وأصبحت حرارة الطقس تُعطى بالدرجة المئوية بدلاً من الفهرنهايت، بينما يقاس تساقط الثلوج بالسنتيمترات. وبحلول عام 1977، تمّ تحويل جميع إشارات الطرق إلى النظام المتري، وأصبحت حدود السرعة تقاس بالكيلومترات في الساعة بدلاً من الأميال في الساعة. لأسباب عمليّة، استغرقت بعض الصناعات وقتاً أطول للتحوّل إلى النظام المتري عن غيرها. ففي عام 1983، كانت طائرات بوينغ 767 الجديدة التابعة لخطوط طيران كندا الأولى التي تتحوّل إلى الوحدات المترية. وأصبح الوقود يقاس باللترات والكيلوغرامات بدلاً من الغالونات والباوندات.

في الثالث والعشرين من يوليو عام 1983، هبطت إحدى طائرات بوينغ 767 التي تمّ تجديدها حديثاً في مونتريال، بعد رحلة روتينية من إدمونتون. وبعد انعطاف قصير، شمل التزوّد بالوقود وتغيير الطاقم، أقلعت الرحلة 143 عند الساعة 17:48 من مونتريال في رحلة العودة، وعلى متنها 61 راكباً وثمانية من أفراد الطاقم.

حلّقت الطائرة على ارتفاع 41,000 قدم أو، كما أشار المقياس الإلكتروني المتري، 12,500 متر، فضبط القبطان روبرت بيرسون الطائرة على الطيّار الآلي واسترخى. بعد نحو ساعة من انطلاق الرحلة، أجفل بيرسون عندما سمع صوت تنبيه عالٍ مصحوباً بأضواء ساطعة على لوحة التحكّم. كانت التحذيرات تشير إلى انخفاض ضغط الوقود في المحرّك الأيسر للطائرة. اعتقد بيرسون أنّ مضخّة الوقود تعطّلت، فأطفأ المنبّه. ذلك أنّه حتّى من دون المضخّة، تستمرّ الجاذبية في سحب الوقود إلى المحرّك. بعد ثوانٍ، انطلق المنبّه نفسه وأومضت أضواء التحذير مجدّداً على لوحة القيادة. هذه المرّة، كان المنبّه يشير إلى المحرّك الأيمن. فما كان من بيرسون إلّا أن أطفأ المنبّه مجدّداً.

مع ذلك، أدرك أنّه، مع وجود خلل محتمل في كلا المحرّكين، سيضطرّ إلى تحويل مساره إلى وينيبيغ القريبة لفحص الطائرة. وبينما كان يفكّر في ذلك، صدر صوت عن المحرّك الأيسر ثمّ تعطّل. فاتّصل بيرسون عبر اللاسلكي بوينيبيغ، وأبلغهم أنّه مضطرّ للقيام بهبوط اضطراري بمحرّك واحد. وبينما كان يحاول يائساً إعادة تشغيل المحرّك الأيسر، سمع ضجّة من لوحة التحكّم لم يسبق له أن سمعها من قبل، لا هو ولا مساعده الأوّل، موريس كوينتال. لقد توقّف المحرّك الثاني وانطفأت أدوات الطيران الإلكترونية التي تعمل بالكهرباء المولّدة من المحرّك. أمّا السبب في عدم سماع بيرسون أو كوينتال الإنذار من قبل فيرجع إلى أنّ تدريبهما لم يشتمل على احتمال تعطّل كلا المحرّكين. إذ اعتُبر تعطّل المحرّكين في وقت واحد احتمالاً ضئيلاً للغاية بحيث تمّ تجاهله.

لم تكن أعطال المحرّك الأعطال الأولى التي أصابت الطائرة في ذلك اليوم. فعندما تولّى بيرسون قيادة الطائرة في وقت سابق من ذلك النهار، تمّ إبلاغه أنّ مقياس الوقود لا يعمل بشكل صحيح. وبدلاً من إيقاف الرحلة والانتظار لمدّة 24 ساعة لتبديل القطعة، قرّر احتساب كمّية الوقود المطلوبة للرحلة يدوياً. ونظراً لكونه طيّاراً محنّكاً يتمتّع بخبرة تزيد عن 15 عاماً، لم يكن ذلك بالجديد بالنسبة إليه. هكذا، بناءً على متوسّط كفاءة الوقود، مع ترك هامش خطأ، توصّل الطاقم الأرضي إلى أنّه للقيام بالرحلة إلى إدمونتون، ستحتاج الطائرة إلى 22,300 كغ من الوقود. وعند الهبوط في مونتريال، تمّ استخدام مقياس العمق، وتبيّن أنّ الطائرة ما زالت تحتوي على 7682 لتراً. فضُرب هذا الرقم بكثافة الوقود، 1.77 كغ لكلّ لتر، ليتبيّن أنّ الطائرة تحتوي أساساً على 13,597 كغ من الوقود. هذا يعني أنّ الطاقم الأرضي كان بحاجة إلى إضافة 8703 كغ أو 4917 لتراً. ربّما كان يجدر ببيرسون أن يلاحظ وجود مشكلة في هذه المرحلة وليس خلال الرحلة. فعند التحقّق من حسابات الطاقم الأرضي، كان ينبغي أن يتذكّر أنّ كثافة الوقود النفّاث أقلّ من كثافة الماء البالغ 1 كيلوغرام بالليتر، ولكن كانت كندا قد تحوّلت مؤخّراً إلى النظام المتري. مع الأسف، أثناء التحوّل المطوّل لخطوط طيران كندا إلى المقياس المتري، كان الرقم 1.77 الذي قدّمته وثائق الطائرة بخصوص كثافة الوقود خاطئاً. فهذا الرقم يُستعمل لتحويل لترات وقود الطائرات إلى أرطال وليس إلى كيلوغرامات. أمّا الرقم الصحيح فهو أقلّ من ذلك، ويبلغ 0.803، وهو الذي يُستخدم لتحويل اللترات إلى كيلوغرامات. نتيجة هذا الخطأ، لم يكن لدى بيرسون سوى 6169 كغ من الوقود على متن الطائرة. وكان ينبغي على الطاقم الأرضي أن يضيف 20,088 لتراً، أي أربعة أضعاف الكمّية التي احتسبها والبالغة 4917 لتراً. وبدلاً من كمّية الوقود المطلوبة والبالغة 22,300 كغ، أقلعت الرحلة 143 بأقلّ من نصف الوقود اللازم. ولم تتوقّف المحرّكات بسبب عطل ميكانيكي، بل بسبب نفاد الوقود ببساطة.

واصلت الطائرة المنكوبة انزلاقها باتّجاه وينيبيغ، على أمل وحيد هو التمكّن من «الهبوط» بدون طاقة، إذا كان التوقيت مناسباً تماماً. لحسن الحظّ، كان بيرسون خبيراً في الطيران الشراعي، فقام بحساب سرعة الانزلاق المثالية للطائرة من أجل زيادة فرصها في بلوغ وينيبيغ. لكن مع خروج الرحلة 143 من بين السحب، أدرك بيرسون من الأدوات المحدودة المتاحة التي تعمل على البطاريات الاحتياطية أنّهم لن يتمكّنوا من ذلك إطلاقاً. اتّصل ببرج مراقبة الحركة الجوّية في وينيبيغ وأبلغهم بالوضع. فأعلموه أنّ مهبط الطائرات الوحيد الواقع ضمن النطاق المطلوب كان جيملي، الذي يبعد نحو 12 ميلاً من موقعهم الحالي. لحسن الحظّ أيضاً، عمل كوينتال في جيملي عندما كان طيّاراً في القوّات الجوّية الملكية الكندية، وهو يعرف المهبط جيّداً. لكن لا هو ولا أيّ شخص في برج المراقبة في وينيبيغ كانوا يعلمون أنّ جيملي أصبح مطاراً عامّاً وأنّ ذلك الجزء من المطار تمّ تحويله إلى حلبة لرياضة السيّارات. وفي تلك اللحظة بالذات، كان المضمار يستضيف سباقاً للسيّارات، وكان آلاف من الناس في السيّارات وعربات الكارافان يشاهدون من محيط الحلبة.

عندما اقتربت الطائرة من المدرج، حاول كوينتال خفض ترس الهبوط، لكن الأنظمة الهيدروليكية تعطّلت عندما توقفت المحركات عن العمل. كانت الجاذبية كافية لسحب تروس الهبوط الخلفية. ومع أنّ تروس الهبوط الأمامية انخفضت هي الأخرى، إلّا أنّها لم تثبت في مكانها. وهي مصادفة سيكون لها دور كبير قريباً في إنقاذ عديد من الأرواح. مع انطفاء المحرّكات، لم يكن لدى المتفرّجين على السباق أدنى فكرة أنّ طائرة من الصفيح بوزن 100 طنّ كانت تقترب منهم، إلى أن أصبحت فوقهم تقريباً. عندما ارتطمت الطائرة بالمدرج، ضغط بيرسون على الفرامل قدر ما استطاع، الأمر الذي تسبّب بانفجار إطارَين خلفيَين. في الوقت نفسه، انهارت معدّات الهبوط الأمامية غير المثبّتة، لعدم قدرتها على احتمال وزن الطائرة. فارتطمت مقدّمة الطائرة بالأرض، وتسبّبت بنوافير من الشرر الذي تطاير من تحت الهيكل السفلي. أدّى الاحتكاك المتزايد إلى توقّف الطائرة بسرعة، على بعد بضعة مئات من الأمتار من المتفرّجين المذهولين. ثمّ تصرّف مضيفو السباق بسرعة، وهُرعوا لإطفاء الحرائق الصغيرة الناتجة عن الاحتكاك والتي بدأت في مقدّمة الطائرة، بينما تمّ إخراج جميع الركّاب البالغ عددهم 69 راكباً بأمان عبر مخارج الطوارئ.

مشكلة الألفية

إن كان بيرسون قد تمكّن من الهبوط بالطائرة من دون أيّ أدوات تقريباً أو أجهزة كمبيوتر على متنها، فهو بلا شكّ إنجاز عظيم. لكن مع تقدّمنا في القرن الحادي والعشرين، لا يزال عديد من

التقنيات الحديثة يعاني من التسارع الهائل في تطوّره وانتشاره، كما رأينا في الفصل 1. تحديداً، تجتاح أجهزة الكمبيوتر حياتَنا المعاصرة تدريجيّاً، بحيث أصبحنا أكثر قابليّة للتأثّر بتعطّلها. ففي السنوات التي سبقت مطلع الألفية الجديدة، كانت «مشكلة الألفية» تلوح في أفق الشركات التي اعتمدت على برامج الكمبيوتر لتشغيلها. وكان الخلل البرمجي ناتجاً عن إغفال بسيط للغاية في برمجة الكمبيوتر في سبعينيات وثمانينيات القرن العشرين.

لو سألكم شخص ما عن تاريخ ميلادكم، فليس من المستغرب إعطاءه إجابة من ستّة أرقام. صحيح أنّه قد ينتج بعض الغموض عندما يُطلب من طفل بعمر 10 أعوام وشخص بعمر 110 أعوام كتابة تاريخ ميلادهما، لكن يمكن استنتاج العام الصحيح لكلّ منهما من السياق عادة. مع ذلك، غالباً ما تعمل أجهزة الكمبيوتر من دون سياق كهذا. وفي محاولة للاقتصاد قدر الإمكان مع الذاكرة (التي كانت مكلفة في الأيّام الأولى من الحوسبة)، استخدم معظم المبرمجين تنسيقاً للتاريخ مكوّناً من ستّة أرقام. وسمحوا عموماً لبرامجهم بالافتراض أنّ التاريخ ينتمي إلى القرن العشرين. وهذا ما ترك مجالاً للخطأ إذا انتمى التاريخ في الواقع إلى القرن التالي. مع اقتراب فجر الألفية الجديدة، بدأ خبراء الكمبيوتر يحذّرون من أنّ العديد من برامج الكمبيوتر قد لا تتمكّن من التمييز بين عامي 2000 و1900، أو السنة الأولى من أيّ قرن آخر.

عندما بلغت الساعة أخيراً منتصف الليل في الأوّل من يناير 2000، لم يطرأ تغيير يُذكر. لم تسقط أيّ طائرات من السماء، ولم تختف أيّ أموال، أو تُطلق أيّ صواريخ نووية. أدّى عدم ظهور عواقب وخيمة وفورية إلى الاعتقاد على نطاق واسع أنّ المخاوف من مشكلة الألفية قد تمّ تضخيمها كثيراً. حتّى إنّ بعض المتهكّمين أشاروا إلى أنّ صناعة الكمبيوتر ربّما بالغت في تقدير حجم المشكلة عمداً من أجل زيادة أرباحها. أمّا وجهة النظر المعارضة فترى أنّ الإعداد الصارم الذي سبق الحدث ساعد في تجنّب العديد من الكوارث المحتملة. وثمّة العديد من الأخبار الخفيفة عن أنظمة لم تتمّ معالجتها. على سبيل المثال، عرض موقع المرصد البحري الأميركي، وهو المنظّمة المسؤولة عن الحفاظ عن الوقت الرسمي للبلاد، التاريخ كالتالي «1 يناير 19100». مع ذلك، لم تكن بعض أعراض مشكلة الألفية مضحكة فعلاً.

في عام 1999، كان مختبر الأمراض في مستشفى نورثرن جنرال في شيفيلد مركزاً إقليمياً لاختبار متلازمة داون. فكان يتمّ إرسال نتائج اختبارات النساء الحوامل عبر شرق المملكة المتّحدة إلى شيفيلد لتحليلها بواسطة نموذج الكمبيوتر المتطوّر لديهم، والذي يعمل على نظام كمبيوتر هيئة الخدمات الصحية الوطنية، PathLAN. وكان النموذج يأخذ مجموعة من البيانات حول النساء، بما

في ذلك تاريخ الميلاد والوزن ونتائج فحص الدم، من أجل حساب خطر إصابة الجنين بمتلازمة داون. وقد ساعد هذا التقييم للخطر النساء على اتّخاذ قرار بشأن كيفيّة المضيّ قدماً في الحمل، مع إخضاع الأمّهات المعرّضات لخطر مرتفع إلى اختبار أكثر دقّة.

طوال شهر يناير من عام 2000، كان الموظّفون في شيفيلد يجدون عدداً من الأخطاء الطفيفة المنعزلة (المتعلّقة بالتواريخ) في نظام PathLAN، ويتمّ تصحيحها بسرعة وسهولة من دون القلق بشأنها. في وقت لاحق من ذلك الشهر، أبلغت قابلة في إحدى المستشفيات التي يتعامل معها نورثرن جنرال أنّها شاهدت عدداً أقلّ بكثير من حالات ارتفاع خطر الإصابة بمتلازمة داون ممّا توقّعت. كما أبلغت عن النتائج نفسها بعد ثلاثة أشهر، لكن في كلتا المناسبتين، أكّد لها العاملون في المختبر أنّه ما من شيء خاطئ. في شهر مايو، أبلغت قابلة من مستشفى آخر عن قلّة النتائج عالية الخطورة في الاختبارات. أخيراً، اقتنع مدير مختبر علم الأمراض بالتدقيق في النتائج. وسرعان ما أدرك وجود خطأ. لقد فعلت مشكلة الألفيّة فعلها وبقوّة.

في نموذج الكمبيوتر في مختبر علم الأمراض، تمّ استخدام تاريخ ميلاد الأمّ، مع الإشارة إلى التاريخ الحالي، لحساب عمرها. إذ يعدّ عمر الأم أحد عوامل الخطر المهمّة، لأنّه من المرجّح أن تنجب الأمّهات الأكبر سنّاً طفلاً مصاباً بمتلازمة داون. بعد الأوّل من يناير من عام 2000، وبدلاً من طرح تاريخ الميلاد 1965 من العام 2000 للحصول على سنّ الأمّ البالغة 35 عاماً، تمّ طرح 65 من الرقم صفر، ممّا أعطى عمراً سلبياً لم يستطع الكمبيوتر فهمه. وبدلاً من إطلاق تحذير، شوّهت الأعمار غير المنطقية حساب المخاطر بشكل كبير، واضعة كثيراً من الأمّهات المتقدّمات في السنّ في فئة أقلّ خطورة ممّا ينبغي. نتيجة لذلك (وفي حالة مشابهة حدثت مع فلورا واتسون، والدة الطفل كريستوفر، الذي قرأنا قصّته المؤلمة في الفصل 2 عن «الإنذارات السيّئة الكاذبة»)، تمّ إرسال رسائل خاطئة إلى أكثر من 150 امرأة تصنّف أجنّتهنّ على أنّهم في فئة الأقلّ خطورة: سلبيات كاذبة. من بينهنّ أربع نساء كان يمكن أن يخضعن لمزيد من الفحوصات، غير أنّهنّ أنجبن أطفالاً مصابين بمتلازمة داون، وامرأتان أخريان عانين من إجهاض متأخّر.

التفكير الثنائي

تعمل أجهزة الكمبيوتر التي أصبحنا نعتمد عليها بشكل متزايد مع أكثر الأسس بدائية - الأساس 2 أو الثنائي. فمع الأساس 10 للنظام العشري، نحتاج إلى تسعة أرقام وصفر لتمثيل أيّ

رقم. وفي النظام الثنائي الذي يعتمد الأساس 2، نحتاج فقط إلى رقم واحد بالإضافة إلى الصفر. وجميع الأرقام الثنائية هي عبارة عن سلاسل من آحاد وأصفار فقط. في الواقع، تعني كلمة ثنائي أنّه متكّون من جزأين. في نظام القيمة المنزلية الثنائي، يمثّل نفس الرقم في منزلة واحدة إلى يسار جاره عدداً أكبر بعامل 2، بدلاً من عامل 10، كما اعتدنا مع النظام العشري. إذ يمثّل العمود الأوّل إلى اليمين الآحاد، والثاني من اليمين أضعاف 2، والثالث أضعاف 4، والرابع أضعاف 8، وهكذا دواليك. بالتالي، لبناء رقم مثل أحد عشر، نحتاج إلى واحد واثنان وثمانية، من دون أيّ أضعاف أربعة، ولذلك فإنّ التمثيل الثنائي للرقم 11 هو على الشكل التالي، 1011. وفي هذا السياق، تأتي نكتة رياضية قديمة: «لا يوجد سوى 10 أنواع من الناس: من يفهمون النظام الثنائي ومن لا يفهمونه». وبالطبع، 10 تمثّل الرقم اثنين في النظام الثنائي.

يُعتبر النظام الثنائي الخيار الأساسي لأجهزة الكمبيوتر، ليس لأنّ القيام بالرياضيات في النظام الثنائي لطيف بطبيعته، بل بسبب طريقة بناء أجهزة الكمبيوتر. إذ يشتمل كلّ كمبيوتر حديث على مليارات المكوّنات الإلكترونية الصغيرة التي تسمّى الترانزستورات، والتي تتواصل مع بعضها البعض في نقل وتخزين البيانات. ويُعدّ تدفّق الجهد عبر الترانزستور طريقة جيّدة لتمثيل قيمة عددية. لكن بدلاً من العمل بالنظام العشري الذي يوفّر لكلّ ترانزستور 10 خيارات للجهد يمكن تمييزها بشكل موثوق، فإنّه من المنطقي أكثر وجود خيارَين للجهد فقط: تشغيل وإيقاف. مع هذا النظام القائم على «صح أو خطأ»، يمكن استعمال جهد كهربائي صغير لإيصال إشارة موثوقة لا تخطئ إذا حدث تقلّب بسيط. ومن خلال جمع المخرجات الصحيحة أو الخاطئة لهذه الترانزستورات من العمليات المنطقية مثل «و»، «أو»، و«لا»، أظهر علماء الرياضيات أنّه من الممكن، من الناحية النظرية، حساب الإجابة على أيّ حساب رياضي يملك إجابة، مهما كان معقّداً. قطعت أجهزة الكمبيوتر الحديثة شوطاً طويلاً لتطبيق هذه النظريّة بشكل عملي. وهي قادرة على أداء مهام معقّدة على نحو لا يصدّق عن طريق تحويل طلباتنا إلى سلسلة من الآحاد والأصفار وتطبيق منطق بارد وصعب لقلب هذه البِتات ذهاباً وإياباً حتّى توفّر إجابة واضحة. وعلى الرغم من الأعاجيب اليومية التي يمكننا تحقيقها من خلال استخدام نظام القيمة المنزلية الثنائي في الآلات التي تعيش على مكاتبنا وفي جيوبنا، إلاّ أنّه ثمّة أوقات خيّب فيها هذا الأساس البدائي أسياده.

* * *

كانت كريستين لين مايز في السابعة عشرة من عمرها فقط عندما التحقت بالجيش الأميركي في عام 1986. أمضت ثلاث سنوات تخدم في الخارج في ألمانيا كطاهية قبل أن تتقاعد من الخدمة

الفعلية، لتعود بعد ذلك إلى وطنها لدراسة إدارة الأعمال في جامعة إنديانا في بنسلفانيا. وهناك، التقت بصديقها ديفيد فيربانكس. في أكتوبر من عام 1990، وبسبب حاجتها إلى المال للإنفاق على دراستها، عادت للالتحاق بقوّات الاحتياط التابعة للجيش. انضمّت إلى مفرزة التموين 14 (the 14th Quartermaster Detachment)، وهي وحدة مكلّفة بتنقية المياه. في 14 فبراير من عام 1991، تمّ استدعاء الوحدة للقتال، ضمن عمليّة عاصفة الصحراء. وبعد ثلاثة أيّام، تمّ نقل مايز إلى الشرق الأوسط. في اليوم الذي غادرت فيه الولايات المتّحدة، ركع فيربانكس على ركبة واحدة وعرض عليها الزواج. فقبلت مايز عرضه بسرور، لكن خشية أن تُضيع الخاتم، رفضت أخذه معها. فكانت آخر كلمات فيربانكس لخطيبته قبل مغادرتها إلى المملكة العربية السعودية، «حسناً إذاً، سيكون هنا بانتظار عودتك». أخذ فيربانكس الخاتم معه إلى البيت ووضعه فوق صورة لكريستين بجوار الستيريو. غير أنّ الفرصة لن تتاح له بعد ذلك لوضع الخاتم في إصبعها.

عندما وصلت المفرزة 14 إلى قاعدة الظهران الجوّية الغنيّة بالنفط في المملكة العربية السعودية، تمّ نقل أعضائها لمسافة قصيرة إلى ثكناتهم المؤقّتة في مدينة الخُبر على ساحل الخليج. كان المبنى المؤقّت الذي يضمّ وحدة مايز، فضلاً عن وحدات أميركية وبريطانية الأخرى، أكبر بقليل من مستودع معدني صدئ، تمّ تحويله مؤخّراً للسكن البشري. بعد ستّة أيّام من وصولها، أي يوم الأحد الموافق في 24 فبراير، اتّصلت مايز بالوطن لتخبر والدتها أنّها وصلت بأمان وأنّ وحدتها ستنتقل قريباً لمسافة 40 ميلاً نحو الشمال باتّجاه الحدود الكويتية. في اليوم التالي، بعد أن أكملت مناوبتها، وبينما كان بقيّة أفراد الوحدة يسترخون أو يتدرّبون، انتهزت مايز الفرصة للنوم، من دون أن يخطر ببالها أنّ الأحداث التي ستقرّر مصيرها قد بدأت أساساً.

على الرغم من إطلاق أكثر من 40 صاروخ سكود على المملكة العربية السعودية خلال حرب الخليج، إلّا أنّ الهجمات العراقية التي تسبّبت بأضرار جسيمة تقلّ عن عشرة صواريخ. ذلك أنّ معظم الصواريخ التي أصابت المملكة العربية السعودية انحرفت عن مسارها وهبطت في مناطق مدنية، عوضاً عن الأهداف العسكرية المقصودة. ويعزى عدم نجاح العراقيين جزئيّاً إلى نظام صواريخ باتريوت الأميركي. إذ تمّ تصميم النظام للكشف عن الصواريخ القادمة و«اعتراضها» من أجل تدميرها قبل أن تصيب الهدف. واعتمد النظام على الكشف الأوّلي للرادار، يتبعه كشف تأكيدي أكثر تفصيلاً، مصمّم لضمان كون الصاروخ حقيقياً وليس مجرّد ضوضاء زائفة تمّ اكتشافها بواسطة رادار أوّل مفرط النشاط. ومن أجل إجراء كشف أكثر تفصيلاً، كان يتمّ إرسال زمان وموقع

الرؤية الأولى مع تقدير لسرعة الصاروخ. بعد ذلك تُستخدم هذه المعلومات لإنتاج نافذة ضيّقة للبحث عن المواقع المحتملة للصاروخ، ممّا يتيح التحقّق بتفصيل أكبر.

حرصاً على الدقّة، يقوم نظام باتريوت بحساب الوقت بأعشار الثانية. لكن لسوء الحظ، ومع أنّ العشر يمثَّل في النظام العشري برقم قصير هو «0.1»، إلّا أنّه في النظام الثنائي يعطي رقماً ممتدّاً ومتكرّراً لا حدود له هو 0.000110011001100110011001100..... إذ تتكرّر الأرقام الأربعة 0011 إلى ما لا نهاية. وبما أنّه لا يمكن لأيّ كمبيوتر تخزين عدد لا نهائي من الأرقام، فقد عمد نظام باتريوت إلى تقريب العُشر باستخدام 24 رقماً ثنائياً. وبما أنّ هذا الرقم هو تمثيل مقتطع، فإنّه يختلف عن القيمة الحقيقية للعُشر بنحو واحد على عشرة ملايين من الثانية. فافترض المبرمجون الذين كتبوا الرمز الذي يحكم نظام باتريوت أنّ هذا الفارق الضئيل لن يُحدث أثراً عملياً. مع ذلك، عندما تمّ تشغيل النظام لفترة طويلة من الزمن، يتراكم الخطأ في الساعة الداخلية لنظام باتريوت ليتحوّل إلى شيء مهمّ. وبعد نحو 12 يوماً، يصبح مجموع الخطأ الإجمالي في وقت تسجيل باتريوت ثانية واحدة تقريباً.

عند الساعة 20:35 من يوم 25 فبراير، كان نظام باتريوت يعمل لأكثر من أربعة أيّام على التوالي. وبينما كانت مايز نائمة، أطلق الجيش العراقي رأساً حربياً فوق صاروخ سكود باتّجاه الساحل الشرقي للمملكة العربية السعودية. وبعد دقائق، وبينما كان الصاروخ يعبر المجال الجوّي للمملكة، اكتشف رادار باتريوت الأوّل الصاروخ وأرسل بياناته إلى الرادار الثاني للتحقّق. عندما تمّ تمرير البيانات من رادار إلى آخر، كان وقت الكشف قد اختلّ بمقدار ثلث الثانية تقريباً. ومع صاروخ سكود المنطلق بسرعة تفوق 1600 متر في الثانية، أساء النظام تقدير الموقع بأكثر من 500 متر. فتّش الرادار الثاني المنطقة التي يُتوقّع أن يعثر فيها على الصاروخ، ولكن عبثاً. فافترض النظام أنّ الإنذار خاطئ وتمّت إزالته[117].

عند الساعة 20:40، ضرب الصاروخ الثكنات التي كانت مايز نائمة فيها، ممّا أدّى إلى مقتلها مع 27 من زملائها وجرح نحو 100 آخرين. وكان هذا الهجوم الذي وقع قبل ثلاثة أيّام من انتهاء الأعمال القتالية مسؤولاً عن مقتل ثلث الجنود الأميركيين الذين لقوا حتفهم في حرب الخليج الأولى، وربّما كان من الممكن تجنّبه لو أنّ أجهزة الكمبيوتر تحدّثت بلغة مختلفة - على أساس مختلف.

مع ذلك، ما من أساس قادر على تمثيل كلّ الأرقام تماماً بواسطة مجموعة محدودة من الأرقام. مع أساس مختلف، ربّما كان من الممكن تجنّب الخطأ الذي ارتكبه نظام باتريوت للكشف

عن الصواريخ، ولكن لا شكّ أنّ أخطاء أخرى كانت لتقع بدلاً من ذلك. لذلك، وعلى الرغم من قلّة الأخطاء التي تنتج، إلّا أنّ المزايا التي يوفّرها النظام الثنائي على صعيد الطاقة والموثوقية يجعله الخيار الأكثر منطقيّة لأجهزة الكمبيوتر الحاليّة. غير أنّ هذه المزايا سرعان ما تتبخّر إذا حاولنا استخدام النظام الثنائي في سياق مجتمعي.

* * *

تخيّلوا أنفسكم تتحدّثون إلى شخص غريب وجذّاب تصادفونه في حافلة مزدحمة. مع اقتراب وصولكم إلى محطّتكم، تطلبون منه إعطاءكم رقم هاتفه المحمول، فيعطيكم رقم هاتف مكوّن من 11 رقماً مثل XXX-XXX-XXX07، وهو التنسيق المشترك لجميع أرقام الهواتف المحمولة في المملكة المتّحدة. لتحقيق مجموعة الأرقام نفسها في النظام الثنائي، فإنّ كلّ رقم هاتف محمول سيتكوّن من أكثر من 30 رقماً. تخيّلوا بالتالي محاولة تسجيل 111011100110101100100111111111111 قبل وصول الحافلة إلى المحطّة وترجّلكم منها. «هل كان ثمّة واحد بعد الصفر السابع أم صفر؟».

الأمر الأكثر أهمّية هو الضرر المحتمل للتفكير الثنائي الذي يجتاح مجتمعنا. ففي الأزمان السحيقة، كانت القرارات السريعة الإيجابية أو السلبية تعني الفرق بين الحياة والموت. إذ لم يكن لدى أدمغتنا البدائية وقت لحساب احتماليّة سقوط صخرة على رؤوسنا. فالتواجد مع حيوان خطير يتطلّب قراراً سريعاً: إمّا القتال أو الهرب. وفي أغلب الأحيان، كان القرار الثنائي السريع والمباشر أفضل من القرار البطيء الذي يزن جميع الخيارات. ومع تطوّر مجتمعاتنا وازديادها تعقيداً، احتفظنا بهذه الأحكام الثنائية. إذ نصادف مجدّداً الصور النمطية لإخواننا البشر كصالحين أو سيّئين، مطيعين أو خطاة، أصدقاء أو أعداء. وهذه التصنيفات بدائية، لكنّها وفّرت لنا اختصاراً يملي علينا كيفيّة التصرّف عند مواجهة كلّ فرد. ومع مرور الوقت، أصبحت هذه الصور النمطية أكثر رسوخاً بواسطة الرسوم الكاريكاتورية الثنائية التي تعدّ شرطاً مسبقاً في العديد من الديانات الثنائية الشعبية. إذ أنّها لا تترك مجالاً لأتباعها لالتشكيك في خصائص الخير والشرّ.

لكن بالنسبة إلى معظمنا في الوقت الحاضر، فإنّ مثل هذه القرارات السريعة والرسوم الكاريكاتورية المطلقة ليست بذات أهمّية. فنحن نملك الوقت للتأمّل بشكل أعمق في خيارات الحياة المهمّة. وبات الناس معقّدين للغاية ليتمّ تصنيفهم بواسطة واصف ثنائي واحد، شديد الغموض، وشديد الدقّة. لا يترك التفكير الثنائي أيّ مساحة على الصفحة لبعض الشخصيّات المفضّلة لدينا:

سنايب، أو غاتسبي، أو هيملت في عالم الأدب. والسبب في إعجابنا بهذه الشخصيات المختلطة والمترسّخة في الغموض الأخلاقي، هو تحديداً لأنّها تعكس شخصيّاتنا المعقّدة والمعيبة. لكنّنا ما زلنا نسعى مع ذلك إلى اليقين المريح للتسميات الثنائيّة للإظهار للعالم الخارجي من نكون كأشخاص: نحن أحمر أو أزرق، يمين أو يسار، مؤمنون أو ملحدون. نخدع أنفسنا في تعريف الذات كواحد من خيارين، بينما يشتمل الطيف في الواقع على كثير من الألوان.

* * *

في موضوعي الخاصّ، الرياضيات، يتمثّل صراعنا الأكبر في مثل هذه الانقسامات الخاطئة التي نفرضها على ذواتنا: أولئك الذين يعتقدون أنّهم يستطيعون القيام بالحسابات، ومن يعتقدون العكس. والمجموعة الأخيرة تضمّ كثيرين. لكن ما من أحد تقريباً لا يفهم الرياضيات على الإطلاق، وما من أحد لا يستطيع العدّ. في الطرف المقابل، وعبر مئات السنين، ما من رياضيين استطاعوا فهم كلّ ما هو معروف في الرياضيات. فكلّنا نملك مكاناً في هذا الطيف، ويعتمد مدى انتقالنا إلى اليسار أو اليمين على مدى اعتقادنا أنّ هذه المعرفة يمكن أن تكون مفيدة لنا.

على سبيل المثال، يمنحنا فهم الأنظمة العددية من حولنا نظرة ثاقبة على تاريخ وثقافة جنسنا. ولا يجب أن نخشى هذه الأنظمة التي تبدو غريبة وغير مألوفة في أغلب الأحيان، بل أن نحتفي بها. فهي تخبرنا كيف فكّر أسلافنا، وتعكس جوانب تقاليدهم. بالإضافة إلى ذلك، فهي تشكّل مرآة واقعية لبيولوجيّتنا الأساسيّة، وتُثبت أنّ الرياضيات جوهرية بالنسبة إلينا مثل أصابع أيدينا أو أقدامنا. إنّها تعلّمنا لغة التكنولوجيا الحديثة، وتساعدنا على تجنّب الأخطاء الرياضية البسيطة. في الواقع، وكما سنرى في الفصل التالي، من خلال تشريح الأخطاء التي ارتكبناها في الماضي، توفّر لنا التكنولوجيا الحديثة القائمة على الرياضيات (بنجاح مريب أحياناً) طرقاً لتجنّب ارتكاب الأخطاء نفسها في المستقبل.

6

التحسين المستمرّ: القدرة اللامحدودة للخوارزميات، من التطوّر إلى التجارة الإلكترونية

انبعث الصوت من جهاز الملاحة عبر الأقمار الصناعية قائلاً، «بعد 100 متر، انعطف يميناً... انعطف يميناً». نفّذ روبرتو فرحات ما أملاه عليه الجهاز، وانعطف بالسيّارة التي كان يقودها ومعه زوجته واثنين من أولاده. كان روبرتو يتعلّم القيادة وقد تولّى القيادة عن زوجته - وهي سائقة ماهرة تتمتّع بخبرة 15 عاماً - قبل دقائق فقط. مع انعطافه عن الطريق A6، وجد نفسه في مواجهة سيّارة أودي تزن 2 طنّ تسير في الاتّجاه المعاكس، لتصطدم بالسيّارة من جهة الراكب بسرعة 45 ميلاً في الساعة. فبينما كان فرحات يعير انتباهه إلى جهاز الملاحة، فاتته إشارات السير التي تحذّره من عدم الانعطاف إلى اليمين. لحسن حظّه، خرج من الحادث من دون أن يصاب بأذى. غير أنّ ابنته أميليا، البالغة من العمر أربع سنوات، لم تكن محظوظة مثله. إذ توفّيت في المستشفى بعد ثلاث ساعات.

لقد أصبحنا نعتمد على أجهزة مثل جهاز الملاحة عبر الأقمار الصناعية لتبسيط مهامّ حياتنا اليومية المشحونة على نحو متزايد. لكن عند تحديد المسار الأسرع من A إلى B، يؤدّي جهاز الملاحة مهمّة معقّدة. والحساب الذي يتمّ عند الطلب على شكل خوارزميّة هو الخيار الوحيد الممكن لتحقيق هذه المهمّة. غير أنّه من الصعب على جهاز واحد أن يحتفظ بجميع المسارات الممكنة بين نقطتَي بداية ونهاية بعيدتين عن بعضهما. ومن شأن العدد الهائل من نقاط البداية والنهاية التي قد تُطلب أن يضاعف صعوبة المهمّة إلى حدّ كبير. نظراً إلى صعوبة المشكلة، من المثير للإعجاب أنّ خوارزميات جهاز الملاحة عبر الأقمار الصناعية نادراً جدّاً ما تخطئ. لكن عندما ترتكب الأخطاء، فمن شأن العواقب أن تكون كارثية.

الخوارزميّة هي عبارة عن سلسلة من الإرشادات التي تحدّد الوظيفة بالضبط. ومن شأن المهمّة أن تتفاوت إلى حدّ كبير، من تنظيم مجموعة من السجلّات إلى طهي وجبة. غير أنّ أقدم الخوارزميّات المسجلّة كانت رياضيّة فقط بطبيعتها. إذ كان لدى المصريين القدماء خوارزميّة

بسيطة لضرب رقمين معاً، بينما كان لدى البابليين قواعد لإيجاد جذور مربّعة. وفي القرن الثالث قبل الميلاد، اخترع عالم الرياضيّات اليوناني القديم إراتوستين «غربالاً» - وهو عبارة عن خوارزميّة بسيطة للتخلّص من الأعداد الأوّلية من مجموعة من الأرقام - وكان لدى أرخميدس «طريقة استنفاد» للعثور على أرقام بي pi.

في أوروبا ما قبل التنوير، سمحت زيادة المهارة في المعالجة الميكانيكية بالتجلّي الفيزيائي للخوارزميّات في أدوات مثل الساعات، وفي وقت لاحق، في الآلات الحاسبة القائمة على الترس. بحلول منتصف القرن التاسع عشر، كانت هذه المهارة قد تقدّمت إلى درجة أنّ تشارلز بابيج، المعروف بتعدّد ثقافاته، تمكّن من بناء أوّل كومبيوتر ميكانيكي، كتبت من أجله عالمة الرياضيّات الرائدة آدا لوفليس أوّل برامج الكمبيوتر. في الواقع، كانت لوفليس هي التي أدركت أنّ لاختراع بابيج تطبيقات تتجاوز الحسابات الرياضيّة البحتة التي صُمّم من أجلها في الأساس، وهي أنّ كيانات مثل النوتات الموسيقية، أو ربّما الأهمّ من ذلك، الرسائل يمكن تشفيرها ومعالجتها بالآلة. فتمّ تسخير الحواسيب الآلية الكهروميكانيكية، ومن ثمّ الكهربائية البحتة، لهذا الغرض بالتحديد من قبل الحلفاء في الحرب العالمية الثانية لتشغيل الخوارزميّات التي فكّكت الشيفرات الألمانية. ومع أنّه بالمبدأ كان من الممكن تنفيذ الخوارزميات يدويّاً، إلّا أنّ أجهزة الكمبيوتر النموذجية نفّذت أوامرها بسرعة وبدقّة لا يمكن لجيش من البشر منافستها فيها.

أصبحت الخوارزميّات المعقّدة التي تنفّذها أجهزة الكمبيوتر اليوم جزءاً حيوياً على نحو متزايد من المعالجة الفاعلة لروتين حياتنا اليومي، بدءاً من كتابة استعلام في محرّك بحث أو التقاط صورة على الهاتف، أو ممارسة لعبة كمبيوتر أو سؤال المساعد الشخصي الرقمي عن حال الطقس بعد ظهر هذا اليوم. ونحن لا نقبل بأيّ حلّ قديم أيضاً، بل نريد من محرّك البحث إعطاءنا الإجابة الأكثر صلة بأسئلتنا، وليس الإجابة الأولى التي يجدها. نريد أن نعرف بدقّة ما إذا كان ثمّة احتمال لهطول المطر عند الساعة الخامسة مساءً، لكي نتمكّن من معرفة ما إذا كنّا بحاجة إلى أخذ المعطف معنا إلى العمل. ونريد أن يوجّهنا جهاز الملاحة عبر أسرع طريق من A إلى B، وليس أوّل طريق يكتشفه.

تغيب بشكل واضح عن معظم التعريفات الخوارزمية - وهي قائمة من التعليمات لتحقيق مهمّة معيّنة - المدخلات والمخرجات، أي البيانات التي تعطي للخوارزميّات أهمّيتها. على سبيل المثال، في وصفة طعام، تكون المدخلات هي المكوّنات، في حين أنّ الوجبة التي تقدّمونها على الطاولة هي المخرجات. بالنسبة إلى جهاز الملاحة عبر الأقمار الصناعية، فإنّ المدخلات هي نقطة

البداية والنهاية التي تحدّدونها مع الخارطة التي يحتفظ بها الجهاز في ذاكرته. أمّا المخرجات فهي الطريق التي تقرّر الآلة إيصالك عبرها. ومن دون هذه الصلات بعالم الواقع، فإنّ الخوارزميات ليست سوى مجموعات من القواعد المجرّدة. وفي كثير من الأحيان، عندما نجد خبراً عن خلل في الخوارزميات، فإنّ المدخلات غير الصحيحة أو المخرجات غير المتوقّعة هي القصّة الحقيقية، وليست القواعد نفسها.

سنكتشف في هذا الفصل الرياضيّات الكامنة وراء التحسين الخوارزمي المستمرّ في حياتنا اليومية: من الطريقة التي يتمّ فيها ترتيب نتائج البحث في غوغل، إلى القصص التي تُطرح على صفحاتنا في فايسبوك. كما سنكشف عن الخوارزميّات البسيطة على نحو مضلّل التي تحلّ المشاكل الصعبة والتي يعتمد عليها عمالقة التكنولوجيا في أيّامنا: من نظام الملاحة في خرائط غوغل إلى طرق التسليم في أمازون. كما سنخرج من العالم المحوسب للتكنولوجيا الحديثة ونضع بعض الخوارزميّات بين يديك مباشرة: خوارزميّات التحسين البسيطة التي يمكنك استخدامها للحصول على أفضل مقعد في القطار أو لاختيار صفّ الانتظار الأقصر في السوبر ماركت.

على الرغم من أنّ بعض الخوارزميّات يمكنها أداء مهام معقّدة على نحو يفوق التصوّر، إلّا أنّ بعض جوانب أدائها هي أحياناً دون المستوى الأمثل. هكذا، وبسبب خارطة قديمة العهد، أعطى جهاز الملاحة توجيهات خاطئة لفرحات، الأمر الذي تسبّب بمأساة. في الواقع، لم تكن قواعد تحديد المسار نفسها خاطئة. ولو كانت الخارطة محدّثة، فمن المحتمل أنّ الحادث ما كان ليقع على الإطلاق. غير أنّ هذه القصّة توضح القوّةَ الهائلة للخوارزميّات الحديثة. فهذه الأدوات المذهلة، التي انتشرت وبسّطت العديد من جوانب حياتنا اليومية، لا يجب أن تشكّل مصدراً للخوف. في الوقت نفسه، يجب أن نتعامل معها بحذر، وأن نبقي مدخلاتها ومخرجاتها قيد المراقبة الدقيقة. لكن مع إشراف الإنسان، يأتي احتمال الرقابة والتحيّز. وعند التفكير في ما يمكن أن يحدث عندما يتمّ كبح التحكّم اليدوي، سعياً وراء الحيادية، نكتشف أنّ التحيّز قد يكون مخفيّاً، ومشفّراً داخل الخوارزميّة نفسها، بحيث يشكّل بصمة لميول المخترع. بغضّ النظر عن مدى أهمّية الخوارزميّات المفيدة، يمكن للفهم البسيط لطريقة عملها الداخلية، بدلاً من الثقة العمياء بعمليّاتها الخالية من الخطأ، أن يوفّر الوقت والمال وينقذ الأرواح.

أسئلة المليون دولار

في عام 2000، أعلن معهد كلاي للرياضيّات عن «جائزة مسائل الألفية» السبعة، والتي تُعتبر من أهمّ المسائل التي لم يتمّ حلّها في الرياضيّات[118]. وتشمل القائمة: حدسية هودج، حدسية بوانكاريه، فرضية ريمان، نظرية يانغ ميلز، معادلات نافييه-ستوكس والبنى الملساء، حدسية بيرش وسوينرتون-داير، ومسألة P مقابل NP. ومع أنّ أسماءها غامضة بالنسبة إلى كثيرين خارج بعض المجالات الفرعية الصغيرة نسبياً للرياضيّات، إلّا أنّ لاندون كلاي، المتبرّع الرئيس الذي يحمل المعهد اسمه، أشار فقط إلى مدى أهمّية كلّ من هذه المسائل عندما عرض مليون دولار لقاء إثبات صحّتها أو عدم صحّتها.

في وقت تأليف هذا الكتاب، كان قدتمّ حلّ مسألة واحدة فقط، وهي «حدسية بوانكاريه». حدسية بوانكاريه هي عبارة عن مسألة في مجال الطبولوجيا الرياضي. يمكن اعتبار الطوبولوجيا هندسة (رياضيّات الأشكال) بالعجين. ففي الطوبولوجيا، لا تُعتبر الأشكال الفعلية للأشياء نفسها مهمّة، بل يتمّ بدلاً من ذلك تجميع الأشياء معاً بحسب عدد الثقوب التي تمتلكها. على سبيل المثال، لا يرى الطوبولوجي فرقاً بين كرة القدم أو كرة السلّة أو كرة الركبي أو حتّى الفريسبي. إذا كانت كلّها مصنوعة من العجين، فمن الناحية النظرية، يمكن سحقها أو تمديدها أو التلاعب بها لتبدو شبيهة ببعضها من دون صنع أو إغلاق أيّ ثقوب في العجين. مع ذلك، بالنسبة إلى الطوبولوجي، فإنّ هذه الأشياء تختلف اختلافاً جذرياً عن الحلقة المطّاطية، أو الأنبوب الداخلي للدرّاجة، أو طوق كرة السلّة، التي يملك كلّ منها ثقباً في المنتصف، مثل كعكة البيغل. كذلك فإنّ الرقم 8 الذي يملك ثقبين، أو قطعة البرتزل المملّحة ذات الثقوب الثلاثة هما شيئان طوبولوجيان مختلفان أيضاً.

في عام 1904، اقترح عالم الرياضيّات الفرنسي هنري بوانكاريه (وهو بوانكاريه نفسه الذي تدخّل لوضع حدّ للازدراء الرياضي وتبرئة الكابتن ألفريد دريفوس في الفصل 3) أنّ أبسط شكل ممكن في الأبعاد الأربعة هو الإصدار الرباعي الأبعاد للكرة. ولشرح ما قصده بوانكاريه بـ«بسيط»، تخيّلوا صنع حلقة من خيط حول شيء. إذا أمكنكم إبقاء الخيط على السطح وسحبه بإحكام حتّى تختفي الحلقة، فإنّ الشيء هو، طوبولوجياً، مثل الشكل الكروي. وتُعرف هذه الفكرة باسم «التوصيل البسيط». إذا لم تتمكّنوا من القيام بذلك بواسطة الخيط، فإنّكم أمام شيء طوبولوجي أكثر تعقيداً. تخيّلوا أنّكم تمرّرون الخيط، من الأسفل، عبر وسط كعكة البيغل إلى الأعلى. الآن عندما تقومون بسحب الخيط، فإنّ الكعكة ستقف في الطريق ولن تختفي الحلقة أبداً. بالتالي فإنّ كعكة البيغل ذات الثقب الواحد هي في الأساس أكثر تعقيداً من كرة القدم، التي لا تشتمل على أيّ ثقب. كانت النتيجة مع الأبعاد الثلاثة معروفة أساساً، لكنّ بوانكاريه اقترح أنّ الفكرة نفسها ستصحّ مع الأبعاد

الأربعة. تمّ تعميم حدسيته في وقت لاحق للقول إنّ الفكرة نفسها يجب أن تنطبق على أيّ بعد. مع ذلك، بحلول الوقت الذي أُعلن فيه عن جوائز الألفية، كان قد تمّ إثبات صحّة الحدسية في كلّ بعد آخر، ولم تتبقَّ سوى حدسية بوانكاريه الأصلية المتعلّقة بالأبعاد الأربعة غير مثبتة.

في عامي 2002 و2003، شارك عالم الرياضيّات الروسي المنعزل غريغوري بيرلمان ثلاث مقالات رياضيّة كثيفة مع مجتمع الطوبولوجيا[119]. تهدف هذه المقالات إلى حلّ مسألة الأبعاد الأربعة. واستغرق الأمر عدّة مجموعات من علماء الرياضيّات على مدى ثلاث سنوات للتأكّد من صحّة دليله. في عام 2006، وهو العام الذي بلغ فيه بيرلمان الأربعين عاماً، أي السنّ المحدّدة للجائزة، حصل على ميدالية فيلدز: أي ما يعادل جائزة نوبل في مجال الرياضيّات. ومع أنّ منح الجائزة لم يحدث ضجّة كبيرة خارج أوساط الرياضيّات، إلّا أنّ ذلك لا يقارَن بالقصص التي بدأت تنتشر عندما أصبح بيرلمان أوّل شخص يرفض ميدالية فيلدز على الإطلاق. وفي بيان رفضه للجائزة، قال، «أنا غير مهتمّ بالمال أو الشهرة. لا أريد أن أُعرض مثل حيوان في حديقة للحيوانات». وعندما اقتنع معهد كلاي للرياضيات أخيراً، في عام 2010، أنّه أنجز ما فيه الكفاية ليستحقّ جائزة المليون دولار لحلّ إحدى مسائل جائزة الألفية، رفض أموالهم أيضاً.

P مقابل NP

مع أنّ دليل بيرلمان على حدسية بوانكاريه يُعتبر بلا شكّ جزءاً مهمّاً من العمل في مجال الرياضيّات البحتة، إلّا أنّ تطبيقاته العمليّة قليلة. وينطبق الأمر نفسه على غالبية مسائل جائزة الألفية الستّة الأخرى التي بقيت بلا حلّ حتّى وقت تأليف هذا الكتاب. غير أنّ إثبات أو عدم إثبات المسألة السابعة - المعروفة بإيجاز وعلى نحو غامض إلى حدّ ما في المجتمع الرياضي باسم «P مقابل NP» - يفتح إمكانات لتداعيات واسعة النطاق في مجالات متنوّعة مثل أمن الإنترنت والتكنولوجيا الحيوية.

تقع في صميم تحدّي P مقابل NP فكرة أنّه من الأسهل في كثير من الأحيان التحقّق من الحلّ الصحيح لمسألة ما بدلاً من إنتاج الحلّ في الأساس. وهذا أحد الأسئلة الرياضيّة المفتوحة بالغة الأهمّية، ألا وهو ما إذا كانت كلّ مسألة يمكن التحقّق منها بكفاءة بواسطة جهاز كمبيوتر يمكن حلّها بشكل فاعل أيضاً.

لإعطاء تشبيه، تخيّل أنّك تقوم بتجميع قطع أحجية لصورة خالية من المعالم، مثل صورة لسماء زرقاء صافية. من الصعب تجربة كلّ المجموعات الممكنة من القطع لمعرفة ما إذا كانت تتوافق مع بعضها البعض، لا بل هذا شبه مستحيل. لكن بمجرّد اكتمال الصورة، يصبح من السهل التحقّق من أنّ القطع موجودة في مكانها الصحيح. يتمّ التعبير عن تعريفات أكثر صرامة لمعنى الكفاءة رياضياً من حيث السرعة التي تعمل بها الخوارزميّة مع ازدياد المسألة تعقيداً - عند إضافة مزيد من القطع إلى الأحجية. فثمة مجموعة من المسائل التي يمكن حلّها بسرعة (في ما يعرف باسم «حدودية الزمن») وتسمّى P. وثمّة مجموعة أكبر من المسائل التي يمكن التحقّق منها بسرعة، ولكن ليس بالضرورة حلّها بسرعة، تُعرف باسم NP (وتعني «حدودية الزمن غير الحتمية»). تمثّل المسائل P مجموعة فرعية من المسائل NP، حيث إنّنا من خلال حلّ المسألة بسرعة، نتحقّق تلقائيّاً من الحلّ الذي وجدناه.

تخيّلوا الآن أنّكم تقومون ببناء خوارزمية لتركيب قطع أحجية عامّة. إذا كانت الخوارزمية في P، فقد يعتمد الوقت اللازم لحلّها على عدد القطع، أو على مربّعها، أو مكعّبها أو حتّى القوى العالية لعدد القطع. على سبيل المثال، إذا كانت الخوارزمية تعتمد على مربّع عدد القطع، فقد يستغرق الأمر 4 (22) ثوانٍ لتركيب قطعتي أحجية، و100 (210) ثانية لتركيب 10 قطع من الأحجية، و10,000 (2100) ثانية لتركيب 100 قطعة من الأحجية. يبدو هذا الوقت طويلاً نسبيّاً، ولكنّه لا يزال ضمن بضع ساعات فقط. ولكن إذا كانت الخوارزمية في NP، فإنّ الوقت اللازم لحلّها قد ينمو بشكل أسّي مع عدد القطع. هكذا فإنّ الأحجية المؤلّفة من قطعتين ستستغرق 4 (22) ثوانٍ لحلّها، ولكنّ الأحجية المؤلّفة من 10 قطع قد تستغرق 1024 (102) ثانية، وتلك المؤلّفة من 100 قطعة قد تحتاج إلى 1,267,650,600,228,229,401,496,703,205,376 (1002) ثانية - لتتفوّق بذلك بشكل كبير على الوقت الذي انقضى منذ الانفجار الكبير. تستغرق كلتا الخوارزميتين وقتاً أطول لإتمامهما مع مزيد من القطع، ولكنّ الخوارزميّات اللازمة لحلّ مسائل NP العامّة سرعان ما تصبح غير قابلة للاستعمال مع ازدياد حجم المسألة. في جميع الحالات، يمكن الاعتبار أنّ P تشير إلى جميع المسائل التي يمكن حلّها بشكل عملي (Practically) فيما تشير NP إلى المسائل التي لا يمكن حلّها بشكل عملي (Not Practically).

يتساءل تحدّي P مقابل NP ما إذا كانت جميع المسائل في فئة NP، والتي يمكن التحقّق منها بسرعة ولكن لا توجد خوارزميّة حلّ سريعة معروفة لها، تنتمي في الواقع هي أيضاً إلى الفئة P. فهل يمكن أن يكون لدى مسائل NP خوارزميّة حلّ عملية، ولكنّنا لم نجدها بعد؟ في الاختزال

الرياضي، هل P وNP متساويتان؟ إذا كان الأمر كذلك، فإنّ الآثار المحتملة لذلك، حتّى بالنسبة إلى المهامّ اليومية، ستكون هائلة كما سنرى لاحقاً.

* * *

روب فليمنغ، بطل رواية التسعينيات الكلاسيكية High Fidelity، للمؤلّف نيك هورنبي، هو شخص مهووس بالموسيقى يملك متجر Championship Vinyl للتسجيلات المستعملة. يقوم روب دورياً بإعادة تنظيم مجموعته الضخمة من التسجيلات وفقاً لتصنيفات مختلفة: أبجدياً، أو زمنياً، أو حتّى بحسب سيرته الذاتية (يروي قصّة حياته من خلال الترتيب الزمني الذي اشترى به تسجيلاته). بصرف النظر عن كون الفرز تمريناً مريحاً لعشّاق الموسيقى، فإنّه يتيح إمكانيّة إيجاد البيانات بسرعة وإعادة ترتيبها لعرض الفروق الدقيقة المختلفة بينها. فعند النقر على الزرّ الذي يتيح لك التبديل بين عرض رسائل البريد الإلكتروني حسب التاريخ أو المرسل أو الموضوع، يقوم عميل البريد الإلكتروني الخاصّ بك بتنفيذ خوارزميّة فرز فاعلة. يطبّق eBay خوارزميّة فرز عندما تختار إلقاء نظرة على العناصر المطابقة لمصطلح البحث الخاصّ بك على أساس «أفضل تطابق» أو «أدنى سعر» أو «ينتهي قريباً». وبمجرّد أن يقرّر غوغل مدى توافق صفحات الويب مع مصطلحات البحث التي أدخلتَها، يتمّ تصنيف الصفحات بسرعة وعرضها لك بالترتيب الصحيح. والخوارزميّات الفاعلة التي تحقّق هذا الهدف مطلوبة جدّاً.

تتمثّل إحدى الطرق لفرز عدد من العناصر في إنشاء قوائم تحتوي على تسجيلات بكلّ تعديل ممكن، ومن ثمّ التحقّق من كلّ قائمة لمعرفة ما إذا كان الترتيب صحيحاً أم لا. تخيّلوا أنّ لدينا مجموعة تسجيلات صغيرة جدّاً تضمّ ألبوماً واحداً لكلّ من Led Zeppelin, Queen, Coldplay, Oasis وAbba. مع هذه الألبومات الخمسة فقط، لدينا 120 طريقة ترتيب ممكنة. ومع ستّة، يصبح لدينا 720، ومع 10، نجد أمامنا ما يزيد عن ثلاثة ملايين طريقة ترتيب ممكنة. بالتالي فإنّ عدد أشكال الترتيب المختلفة ينمو بسرعة كبيرة مع عدد التسجيلات. وهكذا فإنّ أي هاوي تسجيلات يملك مجموعة محترمة لن يتمكّن حتّى من التفكير في جميع القوائم المحتملة، فهذا مستحيل ببساطة.

لحسن الحظّ، وكما تعلم من التجربة، فإنّ تصنيف مجموعة تسجيلات أو كتب أو أقراص DVD هو مسألة من فئة P - أي واحدة من تلك المسائل التي تملك حلّاً عملياً. تُعرف أبسط هذه الخوارزميّات باسم «ترتيب الفقاعة»، وتعمل كالتالي. نختصر الفنّانين في مجموعتنا الصغيرة من

التسجيلات إلى الأحرف الأولى من أسمائهم L, Q, C, O, A، ونفترض أنّنا نرغب بترتيب التسجيلات أبجدياً. ينظر ترتيب الفقاعة على طول الرفّ من اليسار إلى اليمين، ويقوم بتبديل أزواج التسجيلات المجاورة لبعضها التي يجدها في غير ترتيبها الصحيح. ويواصل المرور عبر التسجيلات إلى أن لا يتبقّى أيّ زوج منها خارجاً عن الترتيب الصحيح، أي تصبح القائمة بأكملها مرتّبة أبجدياً. في المرّة الأولى، تبقى L على حالها لأنّها تسبق الحرف Q في الأبجدية، ولكن عندما تتمّ مقارنة Q وC ويتبيّن أنّهما في الترتيب الخاطئ، يتمّ تبديلهما. فيقوم ترتيب الفقاعة بتبديل Q مع O، ومن ثمّ مع A خلال جولته الأولى، لتصبح القائمة كما يلي: L، C, O, A, Q. مع انتهاء هذه الجولة، يتمّ نقل Q إلى مكانها الصحيح في آخر القائمة. في الجولة الثانية، يبدّل C مع L، وتُعطى A مكاناً سابقاً لـO، بحيث تقع O الآن في مكانها الصحيح: C, L, A, O, Q. نحتاج الآن إلى جولتين أخريين قبل أن تصبح A على رأس القائمة المرتّبة أبجدياً.

مع وجود خمسة تسجيلات نحتاج إلى تصنيفها، اضطررنا للمرور بالقائمة غير المرتّبة أربع مرّات، وإجراء أربع مقارنات في كلّ مرّة. ومع 10 تسجيلات، سيترتّب علينا القيام بتسع جولات، وتسع مقارنات في كلّ مرّة. هذا يعني أنّ حجم العمل الذي يتعيّن علينا القيام به خلال الترتيب ينمو تقريباً بمقدار مربّع عدد الأشياء التي نقوم بترتيبها. ومع وجود مجموعة كبيرة، فهذا يتطلّب الكثير من العمل، لكنّ 30 تسجيلاً ستحتاج إلى مئات المقارنات بدلاً من تريليونات عديدة من التبديلات المحتملة التي قد نحتاج إلى التحقّق منها مع خوارزميّة تسرد جميع أشكال الترتيب الممكنة. على الرغم من هذا التحسّن الهائل، كثيراً ما يسخر علماء الكمبيوتر من ترتيب الفقاعة باعتباره غير فاعل. في التطبيقات العمليّة، مثل أخبار الفايسبوك، أو صور إنستاغرام، التي يجب فيها فرز مليارات المنشورات وعرضها وفقاً لأحدث أولويّات عمالقة التكنولوجيا، يتمّ استبعاد ترتيبات الفقاعة البسيطة لصالح أنواع أحدث وأكثر كفاءة. يعمل ترتيب الدمج، على سبيل المثال، عن طريق تقسيم المنشورات إلى مجموعات صغيرة تُفرَز بعد ذلك بسرعة وتُدمج معاً في الترتيب الصحيح.

في الفترة التي سبقت الانتخابات الرئاسية الأميركية لعام 2008، بعد فترة وجيزة من إعلان جون ماكين ترشيحه، تمّت دعوته للتحدّث في غوغل عن سياساته. فمازحه إريك شميدت، الرئيس التنفيذي لشركة غوغل آنذاك قائلاً إنّ الترشّح للرئاسة يشبه إلى حدّ كبير إجراء مقابلات في غوغل. ثمّ انتقل ليطرح على ماكين سؤال مقابلة حقيقي يُطرح في غوغل: «كيف تحدّد طرق جيّدة لفرز مليون عدد صحيح من 32 بت في ذاكرة وصول عشوائي (RAM) من اثنين ميغابايت؟». بدا

ماكين مربكاً للغاية، وبعد أن استمتع شميدت بالمشهد، انتقل بسرعة إلى سؤاله الجادّ التالي. بعد ستّة أشهر، عندما كان باراك أوباما على المقعد الساخن في غوغل، طرح عليه شميدت السؤال نفسه. نظر أوباما إلى الجمهور، ثمّ مسح عينه وبدأ يقول، «حسناً، ...». شعر شميدت بحرجه، وحاول أن يتدخّل، فما كان من أوباما إلّا أن أنهى جملته وهو ينظر إلى شميدت مباشرة، «لا، لا، لا، لا، لا أعتقد أنّ ترتيب الفقاعة هو الوسيلة المناسبة لذلك»، ليتبع ذلك تصفيق وهتاف هائل من علماء الكمبيوتر المحتشدين. كان ردّ أوباما الذي ينمّ عن سعة اطّلاع غير متوقّعة - ألقى نكتة حول عدم فاعليّة إحدى خوارزميّات الفرز - سمة ميّزت الكاريزما التلقائيّة (نتيجة تحضير مستفيض) التي تحلّى بها خلال حملته بأكملها، والتي أوصلته في النهاية إلى البيت الأبيض.

* * *

مع وجود خوارزميّات فرز فاعلة، يسرّنا أن نعرف أنّنا إذا رغبنا في إعادة ترتيب مجموعة من الكتب أو من أقراص دي في دي، فلن يستغرق الأمر وقتاً أطول من عمر الكون.

بالمقابل، ثمّة مشاكل بسيطة يسهل طرحها، ولكنّها تتطلّب وقتاً هائلاً لحلّها. تخيّلوا شخصاً يعمل لدى شركة تسليم كبيرة مثل DHL أو UPS، ولديه عدد من الرزم التي يحتاج إلى توصيلها خلال مناوبته، قبل أن يعيد ركن شاحنته في المستودع. بما أنّه يتقاضى راتبه بحسب عدد الرّزم التي يسلّمها، وليس بحسب الوقت الذي يستغرقه في التسليم، فهو يريد إيجاد أسرع طريق للمرور بجميع نقاط التوصيل. هذا جوهر لغز رياضي قديم ومهمّ يُعرف باسم «مسألة البائع المتجوّل». فمع ازدياد عدد المواقع التي يتعيّن عليه المرور بها، تصبح المشكلة صعبة للغاية وبسرعة كبيرة، في ما يسمّى بـ«الانفجار التوافقي». ينمو معدّل زيادة الحلول الممكنة عند إضافة مواقع جديدة بشكل أسرع حتّى من النموّ الأسّي. فإذا بدأت بـ 30 موقع توصيل، فسيكون لديك 30 خياراً لأوّل توصيلة و29 خياراً للثانية و28 للثالثة، وهكذا دواليك. وهذا ما يعطي حاصل $30 \times 29 \times 28 \times ... \times 3 \times 2$ طريقاً مختلفة. بتعبير فعلي، فإنّ عدد المسارات مع 30 وجهة فقط يبلغ 265 نونيليون - أي 265 يتبعها 30 صفر. لكن هذه المرّة، وخلافاً لمسألة الفرز، ما من طرق مختصرة - أي ما من خوارزميّة عمليّة تعمل في حدوديّة الزمن لإيجاد الإجابة. إنّ التحقّق من الحلّ الصحيح لا يقلّ صعوبة عن إيجاد حلّ في المقام الأوّل، نظراً لأنّ جميع الحلول الممكنة الأخرى تحتاج إلى التحقّق أيضاً.

بالعودة إلى مقرّ التوصيل، قد يكون ثمّة مدير لوجستي يحاول توكيل عمليّات التسليم التي ينبغي إجراؤها يوميّاً لعدد من السائقين، مع التخطيط لمساراتهم المثلى. تُعرف هذه المهمّة بمسألة

توجيه السيّارة، وهي أصعب من مسألة البائع المتجوّل. يظهر هذان التحدّيان في كلّ مكان، بدءاً من تخطيط مسارات الحافلات عبر المدينة، وجمع الرسائل من صناديق البريد واختيار الموادّ الموجودة على أرفف المستودعات، إلى حفر ثقوب في لوحات الدوائر الكهربائية، وصنع الرقائق الدقيقة، وتوصيل الأسلاك بأجهزة الكمبيوتر.

الميزة الوحيدة لكلّ هذه المسائل أنّه بالنسبة إلى بعض المهامّ، يمكننا التعرّف على الحلول الجيّدة عندما توضع أمامنا. فإذا طلبنا مسار توصيل أقصر من 1000 ميل، فبإمكاننا التحقّق بسهولة ممّا إذا كان ثمّة حلّ معيّن يناسب ذلك، حتّى لو لم يكن من السهل العثور على مثل هذا المسار في المقام الأوّل. وهذا ما يُعرف باسم «نسخة القرار» لمسألة البائع المتجوّل، والتي نجيب عليها بنعم أو لا. إنّها واحدة من المسائل التي تندرج ضمن الفئة NP والتي يصعب إيجاد حلول لها، لكنّ التحقّق من صحّة الحلّ أمر سهل.

على الرغم من صعوبة ذلك، إلّا أنّه يمكن إيجاد حلول دقيقة لمجموعات محدّدة من الوجهات حتّى لو لم يكن ذلك ممكناً بشكل عامّ. فقد أمضى بيل كوك، أستاذ علم التوافق والتحسين في جامعة واترلو في أونتاريو، نحو 250 عاماً من زمن الكمبيوتر على كمبيوتر فائق موازٍ يحسب أقصر طريق بين جميع الحانات في المملكة المتّحدة. شمل عمله 49,687 حانة على طول 40,000 ميل فقط - أي ما متوسّطه حانة واحدة كلّ 0.8 ميل. قبل وقت طويل من بدء كوك بحساباته، كان بروس ماسترز من بيدفوردشاير في إنكلترا يجري نسخته العمليّة لهذه المسألة. فهو يحمل عن جدارة الرقم القياسي في موسوعة غينيس لزيارة أكبر عدد من الحانات. وبحلول عام 2014، كان الرجل البالغ 69 عاماً قد تناول كأساً من الشراب في 46,495 حانة مختلفة. ابتداء من عام 1960، يقدّر بروس أنّه قطع أكثر من مليون ميل في سعيه إلى زيارة جميع حانات المملكة المتّحدة - أي أطول بـ 25 مرّة من طريق بيل كوك الأكثر كفاءة. فإن كنتم تخطّطون للقيام بحساب مماثل بأنفسكم، أو حتّى بمجرّد جولة على حانات المنطقة، يجدر بكم على الأرجح الرجوع إلى خوارزميّة كوك أوّلاً[120].

* * *

يعتقد علماء الرياضيات بغالبيّتهم العظمى أنّ P وNP هما فئتان من المسائل تختلفان عن بعضهما اختلافاً جذرياً - وأنّه لن يكون لدينا أبداً خوارزميّات سريعة لإرسال مندوبي المبيعات أو لرسم مسارات للسيّارات. وقد يكون ذلك أمراً جيّداً. إذ تُعتبر «نسخة القرار» المتمثّلة بنعم-كلّا لمسألة البائع المتجوّل مثالاً أساسيّاً لمجموعة من المسائل المعروفة باسم NP-تامّة. فثمّة نظريّة قويّة

تفيد أنّه إذا تمكّنا من إيجاد خوارزميّة عمليّة تحلّ مسألة NP-تامّة فإنّنا سنتمكّن من نقل هذه الخوارزميّة لحلّ أيّ مسألة NP أخرى، ممّا يثبت أنّ P تساوي NP - أي أنّ P وNP هما في الواقع فئة واحدة من المسائل. وبما أنّ تشفير الإنترنت يعتمد بأكمله تقريباً على صعوبة حلّ بعض مسائل NP، فالإثبات أنّ P تساوي NP يمكن أن يكون كارثياً على أمن الإنترنت.

مع ذلك، وعلى الجانب الإيجابي، قد نتمكّن من تطوير خوارزميّات سريعة لحلّ جميع أنواع المشكلات اللوجستية. يمكن للمصانع جدولة المهام لتعمل بأقصى قدر من الكفاءة، ولشركات التوصيل إيجاد مسارات فاعلة لنقل رزمها، ممّا قد يساهم في انخفاض أسعار السلع - حتّى لو لم يعد بإمكاننا طلبها بأمان عبر الإنترنت! على الصعيد العلمي، قد يوفّر إثبات أنّ P تساوي NP طرقاً فاعلة لرؤية الكمبيوتر، والتسلسل الجيني، وحتّى توقّع الكوارث الطبيعية.

لكن من المفارقات، وعلى الرغم من أنّ العلم قد يكون الفائز الأكبر إذا ثبت أنّ P تساوي NP، إلّا أنّ العلماء أنفسهم قد يكونون أكبر الخاسرين على هذا الصعيد. فقد اعتمدت بعض من أهمّ الاكتشافات العلميّة على التفكير الإبداعي لأشخاص على درجة عالية من التدريب والتفاني، المتجذّرين بعمق في مجالاتهم: نظريّة داروين للتطوّر عن طريق الانتقاء الطبيعي، ودليل أندرو وايلز على نظريّة فيرمات الأخيرة، ونظريّة آينشتاين للنسبيّة العامّة، ومعادلات نيوتن للحركة. وإذا ثبت أنّ P تساوي NP، فإنّ أجهزة الكمبيوتر ستكون قادرة على إيجاد أدلّة رسمية على أيّ نظريّة رياضية يمكن إثباتها - ويمكن إعادة إنتاج العديد من أعظم الإنجازات الفكرية للجنس البشري واستبدالها بعمل الروبوت. وسيصبح كثير من علماء الرياضيات عاطلين عن العمل. بالتالي، يبدو أنّ مسألة P مقابل NP هي في صميمها معركة لاكتشاف ما إذا كان يمكن للإبداع البشري أن يصبح آلياً.

خوارزميّات جشعة

تعدّ مسائل التحسين، مثل مسألة البائع المتجوّل، صعبة للغاية لأنّنا نحاول إيجاد أفضل الحلول من بين مجموعة هائلة من الاحتمالات. لكن في بعض الأحيان، قد نكون مستعدّين لقبول حلّ سريع وجيّد بدلاً من حلّ بطيء ومثالي. فربّما كنت لا أحتاج إلى إيجاد الطريقة المثلى لتقليل المساحة المشغولة بالأشياء التي أضعها في حقيبتي قبل أن أذهب إلى العمل. ربّما أحتاج فقط إلى إيجاد طريقة لوضع كلّ شيء فيها وحسب. في هذه الحالة، يمكننا البدء بالبحث عن طرق مختصرة

لكيفيّة حلّ المسائل. يمكننا استخدام خوارزميّات إرشادية (تقريبات أو قواعد تستند إلى المنطق) مصمّمة لجعلنا نقترب من أفضل الحلول لمجموعة واسعة من متغيّرات المسألة.

ثمّة عائلة من تقنيات الحلول تعرف باسم الخوارزميّات الجشعة. تعمل هذه الإجراءات قصيرة النظر من خلال اتّخاذ أفضل خيار محلّي في محاولة لإيجاد حلول مثالية على مستوى العالم. ومع أنّها تعمل بسرعة وكفاءة، إلّا أنّها لا تُنتج حلّاً أمثل أو حتّى حلّاً جيّداً بشكل مضمون. تخيّلوا أنّكم تزورون مكاناً ما للمرّة الأولى وتريدون تسلّق أعلى تلّة في المنطقة للإطلال على الأرض. باستخدّام خوارزميّة جشعة للوصول إلى القمّة، قد تجد الخوارزميّة أوّلاً أشدّ انحدار في موقعكم الحالي، يليها اتّخاذ خطوة في هذا الاتجاه. وبتكرار هذا الإجراء لكلّ خطوة، ستصلون في النهاية إلى نقطة تواجهون فيها انحداراً في كلّ اتّجاه. هذا يعني أنّكم وصلتم إلى قمّة تلّ، ولكن ليس بالضرورة إلى أعلى تلّ. أمّا إذا كنت ترغبون في تسلّق أعلى قمّة للحصول على أفضل إطلالة، فمن غير المضمون أن تقودكم هذه الخوارزميّة الجشعة إلى هناك. قد يكون الطريق إلى قمّة التلّة الصغيرة التي قمتم بتسلّقها قد بدأ بشكل أكثر انحداراً من المسار الذي يقودكم إلى سلسلة الجبال المحلّية، لذا اتّبعتم هذا المسار عن طريق الخطأ، استناداً إلى قِصر نظر إرشادي. بالتالي، بإمكان الخوارزميّات الجشعة إيجاد حلول، لكنّها لا تضمن دائماً إعطاءكم أفضلها. لكن ثمّة مسائل معيّنة من المعروف أنّ الخوارزميّات الجشعة توفّر لها الحلّ الأمثل.

يمكن اعتبار الخارطة التي تستند إلى نظام التنقّل عبر الأقمار الصناعية على أنّها مجموعة من الوصلات التي تربط بينها طرق. وتبدو المشكلة التي تواجه نظام التنقّل عبر الأقمار الصناعية لإيجاد أقصر طريق بين موقعين عبر متاهة من الطرق والتقاطعات أنّها لا تقلّ صعوبة عن مشكلة البائع المتجوّل. في الواقع، يرتفع عدد المسارات الممكنة بسرعة فلكية مع ازدياد عدد الطرق والتقاطعات. إذ يكفي عدد قليل من الطرق وبضعة تقاطعات إلى رفع عدد المسارات الممكنة إلى تريليونات. إذا كانت الطريقة الوحيدة لإيجاد الحلّ تتمثّل في حساب جميع المسارات الممكنة ومقارنة المسافة الإجمالية التي تمّ عبورها لكلّ مسار، فسيشكّل ذلك مسألة من فئة NP. ولحسن حظّ كلّ شخص يستخدم التنقّل عبر الأقمار الصناعية، فقد اتّضح أنّه ثمّة طريقة فاعلة - خوارزميّة ديكسترا - تجد حلّ «مسألة المسار الأقصر» في حدوديّة الزمن[121].

على سبيل المثال، عند محاولة العثور على أقصر طريق من المنزل إلى السينما، تعمل خوارزميّة ديكسترا في اتّجاه عكسي انطلاقاً من السينما. بناء على ذلك، إذا كانت أقصر مسافة من المنزل إلى جميع التقاطعات المرتبطة بالسينما عبر مسار واحد معروفة، فإنّ المهمّة تصبح بسيطة.

إذ يمكننا ببساطة حساب أقصر رحلة إلى السينما عن طريق إضافة أطوال المسارات بين المنزل والتقاطعات القريبة إلى أطوال الطرقات التي تربط التقاطعات بالسينما. بالطبع، في بداية العمليّة، تكون المسافات من المنزل إلى التقاطعات القريبة غير معروفة. ولكن مع تطبيق الفكرة نفسها مجدّداً، يمكننا أن نجد أقصر الطرق إلى هذه التقاطعات قبل الأخيرة باستخدام أقصر الطرق من المنزل إلى التقاطعات التي تتّصل بها. وبتطبيق هذا المنطق بشكل متكرّر، تقودنا التقاطعات بشكل عكسي، واحدة تلو الأخرى إلى المنزل، من حيث نبدأ رحلتنا. هكذا فإنّ إيجاد أقصر طريق عبر شبكة من الطرق يتطلّب منّا ببساطة اتّخاذ خيارات محلّية جيّدة - خوارزميّة جشعة. ولإعادة بناء الطريق، ما علينا سوى تتبّع التقاطعات التي مررنا بها للعثور على هذه المسافة الأقصر. ومن المحتمل أن تكون بعض أشكال خوارزميّة ديكسترا تعمل في الخفاء عندما تطلبون من خرائط غوغل أن تجد لكم أفضل مسار إلى السينما.

عندما تصلون إلى السينما وتذهبون للدفع للعدّاد من أجل ركن السيّارة، فمن المرجّح أنّ آلة التذاكر لن تردّ لكم ما يتبقّى من نقود. إذا كنتم تملكون ما يكفي من العملات المعدنية، فإنّكم ستحاولون تحديد السعر بأسرع وقت ممكن. تتضمّن إحدى الخوارزميّات الجشعة، التي يمارسها كثير منّا بشكل تلقائي، إدخال العملات المعدنية بالتتابع، بحيث تضيفون في كلّ مرّة القطعة ذات القيمة الأكبر التي تقلّ عن إجمالي المبلغ المتبقّي.

تشترك معظم العملات، بما في ذلك عملات بريطانيا، وأستراليا، ونيوزيلندا، وجنوب أفريقيا، وأوروبا، في بنية مؤلّفة من 1-2-5، بحيث تزداد العملات أو الأوراق النقدية تكراراً وفقاً لهذا النمط مع ازدياد فئات العملة. على سبيل المثال، يعتمد النظام البريطاني عملات معدنية من 1 و2 و5 بنس. بعد ذلك تأتي عملات معدنية بقيمة 10 و20 و50 بنساً، تليها العملات المعدنية بقيمة 1 و2 جنيه استرليني، ومن ثمّ أوراق نقدية بقيمة 5 جنيهات استرلينية وأخيراً 10 و20 و50 جنيهاً استرلينياً. بالتالي، لجمع 58 بنساً بالعملات الصغيرة في هذا النظام عن طريق الخوارزميّة الجشعة، يمكنكم اختيار العملة المعدنية من فئة 50 بنساً، وإضافة 8 بنسات إليها. كما يمكن استعمال قطعتين من 20 و10 بنسات وإضافة قطعة من 5 بنسات وأخرى من بنسين وأخيراً بنس واحد. يتبيّن أنّه بالنسبة إلى جميع العملات المستندة إلى نظام 1-2-5، فضلاً عن نظام العملات المعدنية الأميركي، فإنّ الخوارزميّة الجشعة الموصوفة أعلاه تساعد بالفعل على تشكيل المجموع باستخدام أصغر عدد من القطع المعدنية.

من غير المضمون أن تعمل الخوارزميّة نفسها مع كلّ العملات. فإذا كان ثمّة قطعة معدنية من 4 بنسات أيضاً، لسبب ما، فربّما كان من الممكن جمع البنسات الـ 8 الأخيرة من مبلغ 58 بنساً ببساطة أكثر باستخدام قطعتين معدنيتين من 4 بنسات بدلاً من ثلاث قطع من 5 و2 و1 بنس. فأيّ عملة تشتمل على قطع معدنية أو أوراق نقدية تبلغ قيمتها على الأقلّ ضعف القيمة الأصغر التالية سترضي الخاصّية الجشعة. وهذا ما يفسّر مدى انتشار هيكلية 1-2-5 - حيث تضمن نسب 2 أو 2.5 بين الفئات أن تعمل الخوارزميّة الجشعة بنجاح، بينما يتمّ الحفاظ على النظام العشري البسيط. بما أنّ صنع الفئات النقدية الصغيرة هو إجراء شائع، فقد تمّ تحويل جميع عملات العالم تقريباً لإرضاء الخاصّية الجشعة. وتُعتبر طاجكستان، بعملاتها المعدنية التي تضمّ 5 و10 و20 و25 و50 ديراماً، هي الدولة الوحيدة التي لا يرضي نظام عملتها المعدنية الخاصّية الجشعة. فمن الأسرع جمع 40 ديراماً بقطعتين معدنيتين من عشرين ديراماً منه بواسطة قطع من 25 و10 و5 ديرامات التي تقترحها الخوارزميّة الجشعة.

بمناسبة الجشع، هل سبق لكم أن جرّبتم طلب 43 قطعة ناغتس دجاج لدى ماكدونالدز؟ على الأرجح لا، لكنّ هذه الدواجن المقلية شكّلت منطلقاً لبعض النظريّات الرياضيّة المثيرة للاهتمام. ففي المملكة المتّحدة، كانت قطع الناغتس لدى ماكدونالدز تُقدَّم في الأصل في علب من 6 أو 9 أو 20 قطعة. وبينما كان عالم الرياضيات هنري بيكيوتو يتناول الغداء مع ابنه في ماكدونالدز، تساءل عن عدد قطع ناغتس الدجاج التي لن يتمكّن من طلبها مع مجموعات من العلب الثلاثة. تضمنّت قائمته 1 و2 و3 و4 و5 و7 و8 و10 و11 و13 و14 و16 و17 و19 و22 و23 و25 و28 و31 و34 و37 و43. ومنذ ذلك اليوم فصاعداً، أصبحت جميع الأعداد الأخرى من قطع الناغتس قابلة للتحقيق ومعروفة باسم أرقام ماكناغتس. يسمّى العدد الأكبر الذي لا يمكن تكوينه بمضاعفات مجموعة معيّنة من الأرقام عدد فْرُوبينيوس. هكذا كان الرقم 43 هو عدد فروبينيوس بالنسبة لماكناغتس الدجاج. لكن للأسف، عندما بدأ ماكدونالدز يبيع علباً من 4 قطع ناغتس دجاج، انخفض عدد فروبينيوس إلى 11 فقط. ومن المفارقات، أنّه حتّى مع العلبة الجديدة المكوّنة من 4 قطع، ما زالت الخوارزميّة الجشعة تفشل عندما تحاول صنع علبة من 43 قطعة ناغتس (علبتان من 20 تجمع 40 قطعة، لكن ما من علبة من 3 قطع). بالتالي، على الرغم من أنّ الأمر بات ممكناً الآن، إلّا أنّ طلب 43 قطعة دجاج عند شبّاك التسليم السريع ما زال مشكلة صعبة.

متطوّر للغاية

عندما تعمل الخوارزميّات الجشعة، تعدّ أساليب فاعلة لحلّ المشاكل. لكن عندما تفشل، فيمكنها أن تثبت أنّها غير مجدية على الإطلاق. فإذا كنتم متلهّفين للمغامرة في الهواء الطلق والتواصل مع الطبيعة من خلال تسلّق أعلى جبل في المحيط، فلا شكّ أنّ الوصول إلى أعلى تلّ خلد في حديقة منزلكم الخلفية نتيجة اتّباعكم خوارزميّة جشعة غير مرنة ليست بالنتيجة المثالية. لحسن الحظّ، ثمّة عدد من الخوارزميّات المستوحاة من الطبيعة نفسها والتي تساعدنا في الوصول إلى القمّة بالمعنيَين المجازي والحَرفي.

ثمّة عمليّة تعرف باسم تحسين مستعمرة النمل، ترسل جيوشاً من النمل المصمّم بالكمبيوتر لاستكشاف بيئة افتراضية مستوحاة من مشكلة حقيقية. عند معالجة مسألة البائع المتجوّل، على سبيل المثال، يسير النمل بين الوجهات القريبة، بطريقة تعكس قدرة النمل الحقيقي على إدراك بيئته المحلّية فقط. إذا وجد النمل طريقاً قصيراً حول جميع النقاط، فإنّه يضع الفيرومون بطريقة رجعية على هذا الطريق لتوجيه النمال الأخرى. فيتمّ تعزيز الطرق الأكثر شعبية والأقصر مسافة وجذب المزيد من حركة سير النمل. كما في العالم الواقعي، يتبخّر الفيرومون، ممّا يمنح النمل مرونة إعادة تشكيل أسرع مسار إذا تغيّرت الوجهات. تُستخدم هذه العمليّة لإيجاد حلول فاعلة لتحدّيات NP، مثل مسألة توجيه السيّارة والإجابة على بعض أصعب الأسئلة في علم الأحياء، بما في ذلك فهم الطريقة التي تتضاعف بها البروتينات من سلاسل أحادية البعد من الأحماض الأمينية إلى هياكل معقّدة ثلاثية الأبعاد.

إنّ تحسين مستعمرة النمل هي مجرّد واحدة من مجموعة من الأدوات المستوحاة من الطبيعة والمعروفة باسم خوارزميّات ذكاء السرب. على الرغم من أنّ أسراب الزرزور أو أسراب الأسماك تتواصل محلّياً مع عدد صغير من الجيران، إلّا أنّها تغيّر اتّجاهها بطريقة سريعة للغاية ومتماسكة في الوقت نفسه. على سبيل المثال، تنتشر المعلومات حول وجود حيوان مفترس على أحد أطراف سرب الأسماك بسرعة إلى الطرف الآخر من المجموعة. ومن خلال استعارة قواعد التفاعل المحلّية هذه، يمكن لمصمّمي الخوارزميّات إرسال أسراب ضخمة من العوامل الاصطناعية المترابطة لاستكشاف بيئة معيّنة. ويتيح لهم التواصل السريع الذي يشبه السرب البقاءَ على اتّصال مع الاكتشافات التي يقوم بها أفراد آخرون خلال بحثهم عن المحيط الأفضل.

يُعتبر تطوّر الخوارزميّة التطوّرَ الأشهر في الطبيعة. إذ يعمل التطوّر بأبسط أشكاله من خلال الجمع بين سمات الآباء والأمّهات لإنتاج الأطفال. والأطفال الأكثر استعداداً للبقاء على قيد الحياة والتكاثر في بيئتهم يمرّرون خصائصهم إلى ذرّية أكبر في الجيل القادم. في بعض الأحيان،

تحدث طفرات بين الأجيال، متيحة إدخال سمات جديدة قد تكون أفضل أو أسوأ من تلك الموجودة أساساً لدى السكّان. هكذا فإنّ ثلاث قواعد بسيطة - الاختيار والجمع والتحوّل - تكفي لإنتاج التنوّع البيولوجي الذي يحلّ أصعب مشاكل الكوكب.

قبل أن ننطلق من هذا المديح إلى الدواء الشافي المتمثّل في التطوّر البيولوجي، من المهمّ أن ندرك أنّ الحلول التطوّرية غالباً ما تكون جيّدة ولكنّها نادراً ما تكون مثالية. ففي الأفلام الوثائقية عن الحياة البرّية، أو في المقالات التي تدور حول العالم الطبيعي، ليس من غير المألوف أن نسمع عن حيوانات تكيّفت «بشكل ممتاز» مع بيئتها. من فأر الكنغر الذي يقطن الصحراء والذي تطوّر ليمضي طوال حياته من دون شرب الماء مطلقاً، بل يستخرج كلّ الرطوبة التي يحتاج إليها من طعامه، إلى الأسماك غير السِّنّية التي طوّرت بروتينات «مضادّة للتجمّد» حتّى تتمكّن من البقاء في محيطات درجة حرارتها دون الصفر، أنتج التطوّر حيوانات تتكيّف ببراعة مع بيئاتها الصعبة.

مع ذلك، لا ينبغي الخلط بين السعي إلى الكمال واستكشاف التطوّر الأعمى للاحتمالات. فعادة، يجد التطوّر حلّاً يناسب تلك البيئة أكثر من أيّ حلّ سابق، لكنّه لا يأتي دائماً بأفضل طريقة ممكنة لحلّ المشكلة.

يمثّل السنجاب الأحمر الذي يعيش في المملكة المتّحدة مثالاً كلاسيكياً. فبفضل مخالبه الحادّة وأرجله الخلفية المرنة وذيله الطويل الضروري لتحقيق التوازن، يُعتبر متكيّفاً تماماً مع تسلّق الأشجار للبحث عن الطعام. تنمو أسنان هذا الحيوان بشكل مستمرّ طوال حياته، ممّا يسمح للسناجب بتفتيت القشور الخارجية الصلبة للمكسّرات من دون أن تخشى شيئاً ومن دون أن تخسر أسنانها. وكان يبدو متكيّفاً بشكل تامّ مع بيئته، إلى أن وصل قريب مناسب أكثر لتلك البيئة. فالسنجاب الرمادي أكبر حجماً بكثير وهو يعثر على الطعام ويأكله بكمّية أكبر، فضلاً عن هضمه وتخزينه بشكل أكثر كفاءة. وعلى الرغم من أنّ السنجاب الرمادي لم يحارب السنجاب الأحمر أو يقتله، إلّا أنّ قدرته الأعلى على التكيّف جعلته يهيمن بسرعة أكبر على الغابات ذات الأوراق العريضة في إنكلترا وويلز، بحيث نافس السنجابَ الأحمر واحتلّ مساحته البيئية. وربّما ندين في إدراكنا للتكيّف النموذجي للعديد من الأنواع إلى خيالنا المحدود لما يمكن أن يبدو عليه الحلّ «المثالي» بالفعل منه للتطوّر الذي يجد حلّاً أمثل حقيقياً.

على الرغم من أنّ التطوّر لم يجد بالضرورة الحلّ الأفضل، إلّا أنّ علماء الكمبيوتر نشروا عدّة مرّات المبادئ الأساسية لهذه الخوارزميّات المعروفة المصمّمة لحلّ المشاكل بطرق طبيعية، ولا سيّما في ما يسمّى بالخوارزميات «الوراثية». يتمّ استخدام هذه الأدوات لحلّ مشاكل الجدولة

(بما في ذلك تصميم قوائم اللاعبين في البطولات الرياضية الكبرى) وتقديم حلول جيّدة، إن لم تكن مثالية، لمسائل NP الصعبة، مثل «مسألة الحقيبة».

تفترض مسألة الحقيبة أنّ تاجرة تملك كثيراً من البضائع تريد أخذها إلى السوق في حقيبة ظهر ذات سعة محدودة. وبما أنّها لا تستطيع أخذ كلّ شيء معها، فعليها أن تختار الأنسب. ولكلّ غرض حجم مختلف وأرباح مختلفة مرتبطة به. يتمثّل الحلّ الجيّد لمسألة الحقيبة في مجموعة مختارة من البضائع التي تتّسع لها الحقيبة وتعطي ربحاً محتملاً عالياً. وتظهر أشكال مختلفة لمسألة الحقيبة عند قطع أشكال من المعجّنات أو محاولة الاقتصاد في استخدام أوراق لفّ الهدايا في الأعياد. كما تظهر عند تحميل سفن الشحن وتعبئة شاحنات النقل. وعندما يحدد مديرو التنزيلات أجزاء البيانات التي سيتم تنزيلها وبأي ترتيب سيتمّ ذلك من أجل زيادة استخدام عرض النطاق الترددي المحدود للإنترنت، فإنّهم يحاولون حلّ مسألة الحقيبة.

تبدأ الخوارزميّة الجينية بتوليد عدد معيّن من الحلول المحتملة لمسألة معيّنة. وتشكّل هذه الحلول جيل «الأبوين». بالنسبة إلى مشكلة الحقيبة، يتضمّن هذا الجيل الرئيس قوائم من الحزم التي يمكن وضعها في الحقيبة. وتقوم الخوارزميّة بتصنيف الحلول بحسب مدى نجاحها في حلّ المشكلة. بالنسبة إلى مسألة الحقيبة، يعتمد التصنيف على الربح المحتمل الناتج عن قائمة الحزم هذه. ثمّ يتمّ اختيار اثنين من أفضل الحلول - قوائم توليد أكبر قدر من الأرباح. ويتمّ طرح بعض الحزم من أحد الحلول الجيّدة ودمج الباقي مع بعض الحزم المنتمية إلى حلّ جيّد آخر. ثمّة أيضاً احتمال حدوث طفرة - أي إمكانيّة إزالة حزمة يتمّ اختيارها عشوائيّاً من الحقيبة واستبدالها بأخرى. وبمجرّد ولادة أوّل «طفل» (أو حلّ) في الجيل الجديد، يتمّ اختيار حلَّين «أبوين» آخرَين من بين الحلول الأفضل أداءً والسماح لهما بالتكاثر. بهذه الطريقة، تنقل أفضل الحلول في جيل الآباء خصائصها إلى مزيد من الحلول الأبناء في الجيل التالي. وتتكرّر هذه العمليّة المركّبة حتّى يتوفّر عدد كافٍ من الأطفال ليحلّوا محلّ جميع الحلول الأصلية في الجيل الأوّل. بعد انتهاء دور الحلول الأصلية، يتمّ التخلّص منها نهائيّاً، وترقية الحلول الفرعية الجديدة إلى منزلة الآباء، وهكذا تبدأ دورة الاختيار والمزج والطفرة مجدّداً.

نظراً للعشوائيّة الكامنة في طريقة إنشاء الحلول الفرعية، فإنّ الخوارزميّة لا تضمن أن يكون كلّ النسل الذي ستنتجه أفضل من جيل الآباء. في الواقع، كثير من الحلول الفرعية سيكون أسوأ. مع ذلك، من خلال كون الخوارزميّة انتقائيّة بشأن الأطفال الذين سيُسمح لهم بالتكاثر - بقاءٌ افتراضي للأصلح - فإنّها تتخلّص من الحلول غير المجدية وتسمح فقط للأفضل بينها بنقل

خصائصه إلى الجيل التالي. وكما هو الحال مع خوارزميّات التحسين الأخرى، من الممكن أن تصل الحلول إلى الحدّ الأقصى المحلّي، ومعه سيؤدّي أيّ تغيير إلى انخفاض في الصلاحية على الرغم من أنّنا لم نصل بعد إلى أفضل حلّ ممكن. لحسن الحظّ، تسمح لنا العمليّات العشوائيّة للمزج والتحويل (أو الطفرة) بالابتعاد عن هذه القمم المحلّية والمضيّ قدماً نحو حلول أفضل.

للعشوائية التي تعدّ سمة مهمّة لدى الخوارزميّات الجينية دور تؤدّيه في حياتنا اليومية. فعندما تجدون أنفسكم عالقين في روتين مملّ، تصغون إلى الأغاني نفسها للفِرق نفسها مراراً وتكراراً، قد تضغطون على زرّ التبديل. يقوم زرّ التبديل، بأنقى أشكاله، باختيار أغنية عشوائية. والأمر يشبه الخوارزميّة الجينية، من دون مرحلتي الاختيار والمزج، ولكن بدرجة عالية من التحوّل. وقد تكون هذه إحدى الطرق لإيجاد فرقة موسيقية جديدة تتعلّقون بها، ولكن قد تضطرّون إلى التنقّل بين مجموعة من أغاني جاستن بيبر أو غيره للوصول إلى هناك.

توفّر العديد من خدمات بثّ الموسيقى الآن طرقاً أكثر تطوّراً على الصعيد الخوارزمي لخلط الأغاني والموسيقى التي نسمعها. فإن كنتم تستمعون إلى الكثير من أغاني البيتلز وبوب ديلان مؤخّراً، قد تقترح الخوارزميّة الجينية عليكم تجربة فرقة تضمّ خصائص معيّنة تجمع بين الاثنين - مثل مجموعة ترافلينغ ويلبريز (المجموعة الفرعية لبوب ديلان-جورج هاريسون). ومن خلال تخطّي الأغاني أو الاستماع إليها طوال الوقت، فإنّكم تعطون إشارة إلى مقدار ملاءمتها، وبذلك تعرف الخوارزمية أيّ «حلول» تنطلق منها في المستقبل.

ثمّة أيضاً مكوّنات إضافية لنتفليكس تختار أفلاماً أو مجموعات مربّعات عشوائية لتتمكّنوا من مشاهدتها، وتعمل من تفضيلاتكم السابقة. كذلك، قامت مجموعة من الشركات مؤخّراً بتقديم عروض للمساعدة في تخفيف التعب الغذائي عن طريق إرسال اختيارات عشوائية من منتجاتها. من الأجبان والمشروبات إلى الفاكهه والخضار، يمكنكم البدء بتحسين تجربتكم الغذائية واستكشاف أذواق قد لا تعرفون بوجودها، بينما تتعلّم المطاعم، بناءً على تعليقاتكم، ماذا ترسل لكم في المرّة القادمة. من الأزياء إلى عالم الخيال، تستخدم الشركات أدوات من مخزون الخوارزميّات التطوّرية في محاولة لتنشيط تجربتنا الاستهلاكية اليومية.

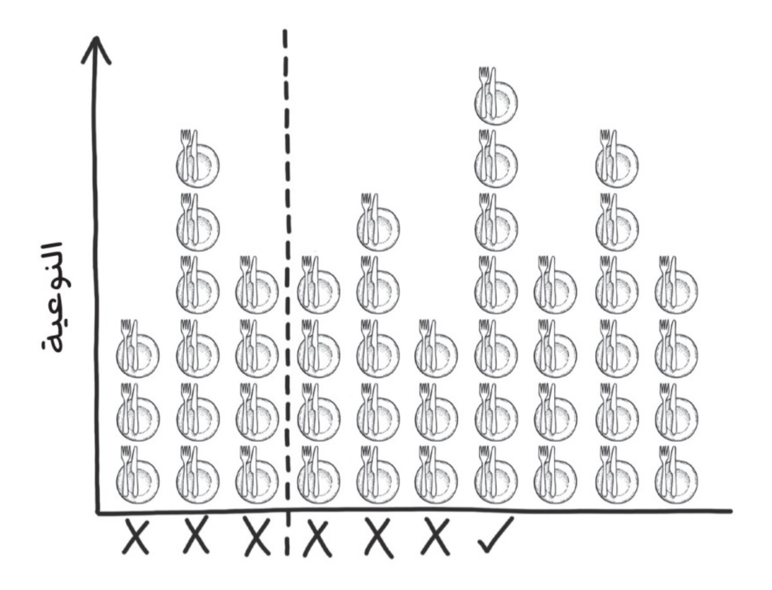
التوقّف الأمثل

على ما يبدو، يشير الأساس الرياضي لبعض خوارزميّات التحسين التي تمّت مناقشتها أعلاه إلى أنّها محميّة تقتصر على عمالقة التكنولوجيا الذين يستغلّونها على نطاق هائل من أجل تحقيق مكاسب تجارية. مع ذلك، ثمّة خوارزميّات أكثر وضوحاً - وإن تكن مدعومة بالرياضيات المعقّدة - والتي يمكن استخدامها لإجراء تحسينات صغيرة ومهمّة في حياتنا اليومية. تُعرف إحدى هذه العائلات باسم «استراتيجيّات التوقّف المثلى»، وتوفّر طريقة لاختيار الوقت الأفضل لاتّخاذ إجراءات من أجل تحسين نتائج عمليّات صنع القرار.

لنفترض مثلاً أنّك ترغب في اصطحاب زوجتك لتناول العشاء. أنتما جائعان بالفعل، لكنّكما ترغبان في العثور على مكان لطيف، ولا تريدان الذهاب إلى أوّل مطعم تصادفانه. تعتبر نفسك حكماً جيّداً وأنّك تستطيع تصنيف جودة كلّ مطعم بالنسبة إلى المطاعم الأخرى. وتعتقد أنّك ستجد الوقت للتحقّق من نحو 10 مطاعم قبل أن تملّ زوجتك من التجوّل. لكن لكي لا تبدو متردّداً، تقرّر عدم العودة إلى مطعم رفضتَه.

تتمثّل أفضل استراتيجيّة لهذا النوع من المشاكل في تفحّص بعض المطاعم ورفضها لأخذ فكرة عمّا هو متاح. يمكنك ببساطة اختيار أوّل مطعم تصادفه، ولكن بما أنّك لا تملك مطلقاً معلومات حول ما هو متاح، فثمّة فرصة واحدة من كلّ 10 أن تختار أفضل مطعم بشكل عشوائي. لذلك، من الأفضل الانتظار حتّى تحكم على عدد من المطاعم أوّلاً، قبل اختيار أوّل مطعم ترى أنّه أفضل من جميع المطاعم الأخرى التي رأيتها حتّى الآن. تمّ توضيح استراتيجيّة اختيار المطعم هذه في الشكل 21. إذ يتمّ الحكم على المطاعم الثلاثة الأولى من حيث الجودة، ومن ثمّ رفضها. ويتبيّن لك أنّ المطعم السابع أفضل من كلّ المطاعم الأخرى حتّى الآن، ولذلك تتوقّف هناك وتأكل عنده. ولكن هل يمكن اعتبار العدد ثلاثة العددَ المناسب للرفض؟ تطرح مسألة التوقّف الأمثل السؤال التالي: كم عدد المطاعم التي يجب أن تتفحّصها وترفضها لكي تأخذ فكرة عمّا هو متاح؟ إذا لم تتفحّص عدداً كافياً، فلن تأخذ فكرة جيّدة عمّا هو متاح، ولكن إذا استبعدت الكثير من المطاعم قبل أن تعتمد على أحدها، فإنّ الخيار المتبقّي سيكون محدوداً.

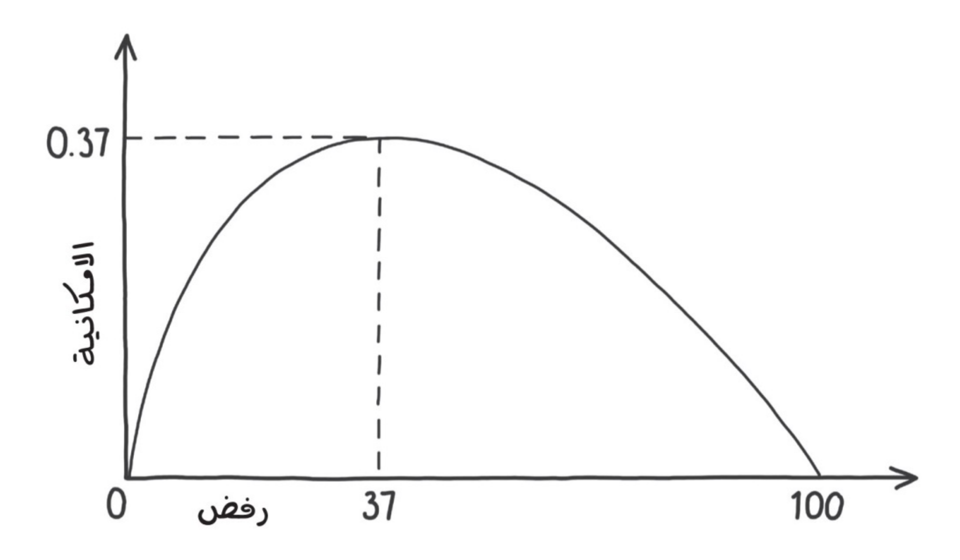
الرياضيّات الكامنة وراء هذه المسألة معقّدة، ولكن اتّضح أنّه يجب عليك الحكم على نسبة 37% الأولى تقريباً من المطاعم (نحو 3 إذا كان عدد المطاعم 10 فقط) ورفضها قبل قبول المطعم التالي الذي تجده أفضل من جميع المطاعم السابقة. بتعبير أدقّ، يجب عليك رفض الكسر e/1 هـ من الخيارات المتاحة، وفيه تمثّل e اختصاراً رياضياً لعدد يعرف باسم رقم أويلر[122]. يعادل رقم أويلر تقريباً 2.718، وبالتالي فإنّ الكسر e/1 يساوي نحو 0.368 أو، كنسبة



الشكل 21: تتمثّل هذه الاستراتيجيّة في تقييم ورفض كلّ خيار، وصولاً إلى نقطة معيّنة للتوقّف (خطّ متقطّع) ومن ثمّ قبول الخيار التالي الذي تقيّمه على أنّه أفضل من جميع الخيارات السابقة.

مئوية، ما يقارب 37%. يوضح الشكل 22 كيف يتغيّر احتمال اختيار المطعم الأفضل من بين 100 مطعم مع تغيّر عدد المطاعم التي ترفضها. ولا عجب أنّك عندما تهبّ وتتّخذ قراراً في وقت قصير جدّاً، فإنّك تخمّن فعليّاً بشكل أعمى، ويكون الاحتمال بالتالي منخفضاً. كذلك، عندما تنتظر طويلاً جدّاً، فمن المحتمل أن يكون الخيار الأفضل قد فاتك أساساً. وتزداد احتماليّة انتقاء الخيار الأفضل عندما ترفض الخيارات الـ 37 الأولى.

لكن ماذا لو كان أفضل مطعم من ضمن الـ 37% الأولى؟ في هذه الحالة، يكون الخيار الأفضل قد فاتك. فقاعدة الـ 37% لا تنجح في كلّ مرّة، لأنّها قاعدة احتمالية. في الواقع، هذه الخوارزميّة مضمونة النجاح فقط بنسبة 37% من الأوقات. هذا هو أفضل ما يمكنك فعله في ظلّ هذه الظروف، ولكنّه أفضل من الـ 10% من المرّات التي كنت ستختار فيها أفضل مطعم لو اخترت المطعم الأوّل من بين 10 مطاعم بشكل عشوائي، كما أنّها أفضل بكثير من نسبة النجاح البالغة 1% لو اخترتَ مطعماً عشوائيّاً من بين 100 مطعم. ويتحسّن



الشكل 22: تزداد احتماليّة انتقاء الخيار الأفضل عندما نحكم على 37% من الخيارات ونرفضها قبل قبول الخيار التالي الذي نقيّمه على أنّه أفضل من جميع الخيارات السابقة. في هذا السيناريو، يبلغ احتمال اختيار أفضل مطعم 0.37 أو 37%.

معدّل النجاح النسبي كلّما ازدادت الخيارات التي تنتقي من بينها.

لا تُستعمل قاعدة التوقّف المثلى مع المطاعم فقط. في الواقع، لفتت المسألة في البداية نظر علماء الرياضيّات كـ«مسألة توظيف»[123]. فإذا كان عليكم إجراء مقابلة مع عدد محدّد من المرشّحين لوظيفة واحداً تلو الآخر، وفي نهاية كلّ مقابلة، يتعيّن عليكم إخبار المرشّح ما إذا كان قد نال الوظيفة أم لا، فما عليكم سوى استخدام قاعدة الـ 37%. قابلوا 37% من المرشّحين واستخدموهم كمرجع. بعد ذلك، وظّفوا أوّل شخص تجدونه أفضل من كلّ الأشخاص السابقين الذين قابلتموهم حتّى تلك اللحظة وارفضوا البقيّة.

عندما أصل إلى صناديق الدفع في السوبر ماركت، أتجاوز الـ 37% الأولى (4 من 11)، وأنتبه إلى طول الطابور ثمّ ألتحق بأوّل طابور أقصر من كلّ الطوابير السابقة. إذا كنت أركض مع مجموعة من الأصدقاء للحاق بآخر قطار بعد سهرة قضيناها في الخارج، ونريد إيجاد العربة التي تحتوي على أكبر عدد من المقاعد الخالية لكي نجلس جميعنا معاً، نستخدم قاعدة الـ 37%. فنتجاوز العربات الثلاث الأولى في قطار من ثماني عربات، ونتذكّر كم هي فارغة، ثمّ نستقلّ العربة الأولى التي نجدها بعد ذلك وتحتوي على عدد من المقاعد الخالية أكثر من الثلاثة الأولى.

على الرغم من أنّ بعض السيناريوهات المذكورة أعلاه واقعيّ للغاية، إلّا أنّ بعضها مفتعل إلى حدّ ما. مع ذلك، يمكن جعله أكثر واقعية. ماذا يحدث لو أنّ نصف المطاعم التي جرّبتها لا تضمّ

طاولة خالية؟ في هذه الحالة، يتبيّن بالطبع أنّه عليك تخصيص وقت أقلّ لرفض المطاعم. وبدلاً من التحقّق من المطاعم الـ 37% الأولى، انظر فقط إلى نسبة 25% الأولى قبل اختيار المطعم الأوّل الأفضل من المطاعم السابقة الذي تجده.

ماذا لو قرّرت أنّك تملك الوقت الكافي للمخاطرة بالعودة إلى عربة سابقة في القطار، ولكنّ احتمال أن تجدها قد امتلأت في هذا الوقت يبلغ 50%؟ بما أنّك توسّع خياراتك بالرجوع إلى الوراء، فيمكنك البحث لفترة أطول قليلاً - ورفض أوّل 61% من العربات قبل اختيار العربة التالية التي تضمّ عدداً أكبر من المقاعد الفارغة. مع ذلك، احرص على ركوب القطار قبل أن يبدأ بالانطلاق.

ثمّة مسائل توقّف أمثل تحدّد لك متى تبيع منزلك، أو على أيّ مسافة من السينما يجب أن تركن سيّارتك لتضاعف فرصك في إيجاد موقف وتقصّر مسافة السير. لكنّ المشكلة أنّه كلّما أصبح الموقف أكثر واقعية، أصبحت الرياضيّات أكثر صعوبة وخسرنا القواعد المئوية السهلة.

حتّى إنّه ثمّة خوارزميّات توقّف أمثل تخبرك بعدد الأشخاص الذين ينبغي عليك مواعدتهم قبل أن يستقرّ رأيك على أحدهم. إذ يجب عليك أوّلاً أن تقرّر عدد الشركاء الذين تعتقد أنّك ستقابلهم حتّى الوقت الذي ترغب بالاستقرار فيه. ربّما كنت تتعرّف على شريك واحد في العام بين الثامنة عشرة والخامسة والثلاثين من عمرك، أي ما مجموعة 17 شريكاً محتملاً للاختيار من بينهم. يقترح التوقّف الأمثل أن تأخذ وقتك لنحو ستّ أو سبع سنوات (نحو 37% من 17 عاماً) في محاولة التعرّف على نوعية الأشخاص المتاحين. بعد ذلك، عليك الالتزام بأوّل شخص تقابله وتجد أنّه أفضل من كلّ الأشخاص السابقين الذين تعرّفت عليهم حتّى تلك اللحظة.

لا يرتاح كثير من الناس إلى السماح لمجموعة محدّدة مسبقاً من القواعد أن تملي عليهم حياتهم العاطفية. فماذا لو وجدت شخصاً يسعدك حقّاً من ضمن الـ 37% الأوائل؟ هل يمكنك رفضه ببرود لأنّك في مهمّة عاطفية خوارزميّة؟ ماذا لو اتّبعت كلّ القواعد وكان الشخص الذي قرّرت أنّه الأفضل بالنسبة إليك لا يعتقد أنّك الأفضل بالنسبة إليه؟ ماذا لو تغيّرت أولويّاتك في منتصف الطريق؟ لحسن الحظّ، مع مسائل القلب، كما هو الحال مع مشاكل التحسين الرياضي الأكثر وضوحاً، لا نحتاج دائماً إلى البحث عن أفضل الحلول. فما أن يجد الإنسان شخصاً يناسبه تماماً، حتّى يتوقّف بحثه على الفور. فمن المحتمل وجود العديد من الأشخاص المناسبين لنا والذين يمكننا أن نكون سعداء معهم. بالتالي فإنّ التوقّف الأمثل لا يقدّم إجابات لجميع مشاكل الحياة.

في الواقع، وعلى الرغم من الإمكانات الهائلة للخوارزميّات في تسهيل العديد من جوانب حياتنا اليومية، إلّا أنّها بعيدة كلّ البعد عن كونها الحلّ الأمثل لجميع التحدّيات. فمع أنّه من الممكن استخدام خوارزميّة ما لتبسيط وتسريع مهمّة رتيبة، إلّا أنّ استعمالها غالباً ما يشتمل على مخاطر. فطبيعتها الثلاثية - التي تشمل المدخلات والقواعد والنواتج - تعني أنّه ثمّة ثلاثة مجالات يمكن أن تُرتكب الأخطاء فيها. وحتّى لو كان المستخدم واثقاً من أنّ قواعد العمليّة محدّدة بحسب متطلّباته، فمن شأن المدخلات غير الحذرة والنواتج غير المنظّمة أن تؤدّي إلى عواقب وخيمة، كما اكتشف البائع على الإنترنت، مايكل فاولر. وتعود جذور خطط البيع الأميركية بالتجزئة المستوحاة من الخوارزميّات، والتي ظهرت فجأة في عام 2013، إلى بريطانيا في بداية الحرب العالمية الثانية.

حافظ على هدوئك وتحقّق من خوارزميّتك

في أواخر يوليو 1939، كانت طبول الحرب تُقرع في بريطانيا العظمى. ولاح في الأفق خطر التعرّض للقصف العنيف أو الغاز السامّ أو حتّى الاحتلال النازي. خشيت الحكومة البريطانية على معنويات الشعب، فأعادت إحياء منظّمة غامضة تأسّست لأوّل مرّة في العام الأخير من الحرب العالمية الأولى للتأثير على التقارير الإخبارية في الداخل والخارج: وزارة الإعلام. في خطوة سابقة للمزيج الأورويلي من وزارتي الحقيقة والسلام، كانت وزارة الإعلام الجديدة مسؤولة عن الدعاية والرقابة أثناء الحرب.

في أغسطس من عام 1939، صمّمت الوزارة ثلاثة ملصقات. كان الأوّل يحمل جملة «الحرّية في خطر، دافع عنها بكلّ ما أوتيت من قوّة»، ويعلوها تاج تيودر. أمّا الثاني فحمل الجملة التالية: «شجاعتك، بهجتك، قرارك سيجلب لنا النصر». بحلول أواخر أغسطس، كانت مئات آلاف النسخ من هذين الملصقين قد طُبعت، وباتت جاهزة للاستخدام في حال اندلاع الحرب. تمّ توزيعها على نطاق واسع خلال الأشهر الأولى من الحرب على جمهور من الشعب البريطاني العظيم، ليشعروا إمّا باللامبالاة أو بأنّه يتمّ استغلالهم.

تمّت طباعة الملصق الثالث في الوقت نفسه، ولكن احتفظت به الحكومة من أجل القصف الجوّي المحتمل المتوقّع، والذي قد يسبّب إحباطاً واسعاً. لكن بحلول الوقت الذي بدأ فيه القصف الألماني في سبتمبر 1940، أي بعد مرور أكثر من عام على بدء الحرب، أدّى نقص الورق،

بالإضافة إلى التعطّف الذي تعامل به الملصقان الأوّلان مع الناس، إلى الازدراء الشعبي للملصقات الثلاثة. ولم يشاهد الملصق الثالث أيّ شخص تقريباً خارج وزارة الإعلام.

في عام 2000، في بلدة ألنويك الهادئة، استلم بائعا الكتب المستعملة ماري وستيوارت مانلي صندوقاً من الكتب المستعملة التي اشترياها مؤخّراً في مزاد علني. وبعد إفراغه، عثروا على ورقة حمراء مجعّدة في أسفله. بعد فتح الورقة، قرءا فيها خمس كلمات من ملصق وزارة الإعلام «المفقود»: «حافظ على هدوئك واصمد».

أحبّت ماري وستيوارت الملصق كثيراً لدرجة أنّهما وضعاه في إطار وعلّقاه على جدار متجرهما، غير أنّه سرعان ما جذب انتباه الزبائن. وبحلول عام 2005، كانا يبيعان منه 3000 نسخة في الأسبوع. لكن لم تنتشر الميم (meme) حقّاً في الوعي العامّ العالمي حتّى عام 2008. فمع الركود الذي ساد جميع أنحاء العالم، سعى كثيرون إلى استحضار السلوك الذي لا يُقهر والذي تميّز بشفافية عالية لدى البريطانيين في الأوقات العصيبة. «حافظ على هدوئك واصمد». انتقلت الرسالة إلى الأكواب، ولوحات فأرة الكمبيوتر، وعلّاقات المفاتيح، وأيّ قطعة من البضائع يمكن تخيّلها. حتّى ورق الحمّام لم يُفلت منها. نُقلت الرسالة في الحملات الإعلانية لمنتجات متنوّعة مثل المطاعم الهندية (حافظ على هدوئك وتناول الكاري) والواقي (حافظ على هدوئك واحمل واحداً). ويبدو أنّ أيّ مزيج كان ينجح «حافظ على هدوئك و[أدخِل فعلاً] [أدخل اسماً].

بعد مدّة، قام التاجر عبر الإنترنت مايكل فاولر بتسخير هذه الفكرة البسيطة. ففي عام 2010، كانت شركة سوليد غولد بومب تبيع قمصاناً مطبوعة مسبقاً تشتمل على نحو 1000 تصميم مختلف عندما خطرت ببال فاولر فكرة لزيادة كفاءة سير عمله. فبدلاً من دفع المال لتخزين أعداد هائلة من القمصان المطبوعة، سينتقل إلى الطباعة حسب الطلب. وهذا ما سيتيح له الترويج للعديد من التصميمات الإضافية، والتي لن تتمّ طباعتها إلّا عند وضع طلبية بذلك. بمجرّد تنظيم عمليّة الطباعة، بدأ بإعداد برامج كمبيوتر تنشئ التصميمات تلقائيّاً. وبين عشيّة وضحاها تقريباً، قفز عدد عروض الشركة من 1000 تصميم إلى أكثر من 10 ملايين. احتوت إحدى هذه الخوارزميّات، التي أنشئت في عام 2012، على قائمة من الأفعال وقائمة من الأسماء، يتمّ دمجها باتّباع الصيغة البسيطة «حافظ على هدوئك و[كلمة من قائمة الأفعال] [كلمة من قائمة الأسماء]». كان يتمّ بعد ذلك فحص العبارات الناشئة عن تلك العمليّة تلقائيّاً بحثاً عن أخطاء نحوية، قبل تثبيتها على صورة القميص وإدراجها للبيع على أمازون مقابل نحو 20 دولاراً لكلّ منها. كان فاولر في ذروة نشاط الشركة يبيع في اليوم 400 قميص تحمل عبارات من مثل، «حافظ على هدوئك ولا تكترث» أو «حافظ على

هدوئك واضحك كثيراً». لكنّ المشكلة أنّ البرنامج أدرج تلقائيّاً عدّة قمصان في أكبر متاجر التجزئة على الإنترنت في العالم مع عبارات على غرار «حافظ على هدوئك واركلها»، أو «حافظ على هدوئك واغتصب كثيراً».

والغريب أنّ العبارات مرّت من دون أن يلاحظها أحد تقريباً لمدّة عام. ولكن في أحد أيّام شهر مارس من عام 2013، اجتاحت صفحة فاولر على فيسبوك فجأة تهديدات بالقتل وادّعاءات أنّه يحرّض على كراهية النساء. ومع أنّه تحرّك بسرعة لسحب التصاميم، إلّا أنّ الضرر كان قد وقع. فعلّقت أمازون صفحات سوليد غولد بومب، وتراجعت المبيعات إلى أن أصبحت معدومة تقريباً. ترنّحت الشركة لثلاثة أشهر، ثمّ انهارت في نهاية المطاف. هكذا فإنّ الخوارزميّة التي صمّمها فاولر، والتي بدت أنّها فكرة ممتازة في ذلك الوقت، كلّفته في النهاية هو وموظّفيه مصدر رزقهم.

لم تفلت أمازون من تلك الأزمة سالمة. ففي اليوم التالي الذي أصدرت فيه شركة سوليد غولد بومب اعتذارها رسمياً عن تلك الكارثة، كانت أمازون لا تزال تعرض قمصاناً تحمل شعارات مثل «ابق هادئاً وتلمّس كثيراً»، و«ابق هادئاً واطعنها». فتمّ تنظيم مقاطعة لعملاق البيع بالتجزئة، وانضمّ اللورد بريسكوت، نائب رئيس وزراء المملكة المتّحدة سابقاً، إلى تلك الحملة: «أوّلاً، تتجنّب أمازون دفع الضريبة للمملكة المتّحدة. والآن، ها هم يكسبون المال من العنف المنزلي». ولا عجب أنّه نتيجة اعتماد العملاق التكنولوجي الكبير على الإجراءات الآلية المحوسبة، فإنّ هذا واحد من المآزق العديدة التي تنطوي عليها الأنشطة الخوارزمية غير الخاضعة للمراقبة والتي تعثّرت بها شركة البيع بالتجزئة الأهمّ في العالم.

* * *

في عام 2011، وجدت أمازون نفسها أيضاً موضع جدل خوارزمي نتيجة استراتيجيات التسعير الآلية. ففي الثامن من أبريل من ذلك العام، طلب مايكل إيزن، عالم الأحياء الحسابي في بيركلي، من أحد الباحثين أن يجلب للمختبر نسخة جديدة من كتاب «صنع الذبابة The Making of a Fly»، وهو عمل كلاسيكي في مجال علم الأحياء التطوّري النشوئي. عندما ذهب الباحث إلى أمازون، فرح بوجود نسختين جديدتين من الكتاب معروضتين للبيع. لكن عندما نظر عن كثب، وجد أنّ أحدهما كان صادراً عن *بروفناث* ومعروض بسعر 1,730,045.91 دولار. أمّا الكتاب الثاني، والصادر عن *بورديبوك*، فكان معروضاً بأكثر من مليوني دولار. بغضّ النظر عن مدى حاجة إيزن للكتاب، ما كان ليجد السعر مبرّراً، ولذلك قرّر مراقبة الكتابين ليرى ما إذا كان ثمنهما

سينخفض. في اليوم التالي، عندما تحقّق من الأسعار، وجد الأمور أسوأ. فقد أصبح الكتابان معروضان بنحو 2.8 مليون دولار. وفي اليوم التالي ارتفع السعر إلى ما يزيد عن 3.5 مليون دولار.

سرعان ما وجد أيزن طريقة لفهم هذا الجنون. ففي كلّ يوم، تحدّد بروفناث سعر كتابها ليكون معادلاً لـ 0.9983 من عرض بورديبوك. في وقت لاحق من اليوم، تقوم بورديبوك بالاطّلاع على قائمة بروفناث وتحدّد سعرها ليكون أكبر بنحو 1.23 مرّة. ويوماً تلو الآخر، تضخّمت أسعار بورديبوك وفقاً لحجمها الحالي، الأمر الذي أدّى إلى نموّ أسّي، وبقيت أسعار بروفناث متخلّفة عنها. ولو كان البائع الذي يتحكّم بالأسعار كائناً بشرياً، لأدرك الأمر بسرعة عندما تخطّت أسعار الكتب المستوى المعقول. لكن مع الأسف، لم تكن عمليّة إعادة التسعير الديناميكية هذه بشرية، بل تتحكّم بها مجموعة من خوارزميّات إعادة التسعير المتاحة لبائعي أمازون. وعلى ما يبدو، لم يفكّر أحد في تضمين خيار حدّ أقصى للسعر في هذه الخوارزميّات، أو إذا كان أحدهم قد فعل، فقد قرّر البائعون عدم استخدامه.

كانت استراتيجية بروفناث القائمة على خفض السعر بشكل هامشي منطقية. فقد كفل ذلك أن تبقى كتبهم هي الأرخص ثمناً، ولتظهر بالتالي على أعلى قائمة البحث، من دون أن تخسر الكثير من الأرباح. ولكن لماذا تختار بورديبوك خوارزميّة تسعّر كتبها باستمرار أعلى من سعر السوق بحيث لا يتمّ طلبها، وتشغل مساحة في مستودعاتها؟ لم يكن ذلك منطقياً على الإطلاق، ما لم تكن بورديبوك بالطبع لا تمتلك الكتاب أساساً. هكذا اشتبه أيزن أنّ بورديبوك تتداول على أساس الموثوقية التي تشير إليها تقييمات المستخدمين القويّة. فإذا قرّر شخص ما شراء كتاب منهم، سيشترون النسخة الحقيقية على وجه السرعة من بروفناث ويبيعونها لزبونهم. وقد سمح لهم رفع السعر تغطية رسوم البريد التي يتعيّن عليهم دفعها وتحقيق ربح على السلعة.

بعد عشرة أيّام من اكتشاف أيزن الأسعار الباهظة لأوّل مرّة، ارتفع السعر ليبلغ 23 مليون دولار. مع الأسف، في 19 أبريل، لاحظ شخص ما في بروفناث السعر السخيف الذي يطلبونه لقاء كتاب يرجع إلى أكثر من 20 عاماً، وأفسدوا متعة أيزن من خلال خفض السعر مجدّداً إلى 106.37 دولار. في اليوم التالي، كان سعر الكتاب لدى بورديبوك قد أصبح 134.97 دولار، أي ما يقرب من 1.23 ضعف سعر بروفناث، وباتت الدورة جاهزة للانطلاق مجدّداً. ارتفع السعر ثانية في أغسطس من عام 2011، لكنّه لم يتجاوز هذه المرّة 500,000 دولار، وبقي غير ملحوظ خلال الأشهر الثلاثة التالية. على ما يبدو، ثمّة من تعلّم الدرس ووضع حدّاً أقصى للسعر، مع أنّه بقي غير واقعي.

وفي وقت كتابة هذه الصفحات، بإمكان المرء العثور على نحو 40 إدراجاً للكتاب تبدأ من سعر معقول يبلغ نحو سبعة دولارات.

على الرغم من ذلك الثمن الباهظ، إلّا أنّ كتاب «The Making of the Fly» ليس أغلى سلعة أُدرجت في القائمة أو بيعت في أمازون. ففي يناير 2010، عثر المهندس برايان كلوغ على نسخة من قرص مضغوط يعمل بنظام التشغيل ويندوز 98 ويدعى «خلايا»، وكان معروضاً للبيع على أمازون لقاء 3 مليارات دولار (بالإضافة إلى 3.99 دولار كلفة البريد والتعبئة). كان السعر المرتفع ناتجاً كما يفترض عن دوّامة سعرية أخرى، حيث تمّ إدراج نسخة ثانية من القرص المضغوط نفسه من قبل بائع آخر لم يتجاوز سعرها 250,000 دولار بالمقارنة. تابع كلوغ وأدخل تفاصيل بطاقة ائتمانه لشراء القرص. لكن بعد بضعة أيّام، أرسلت له أمازون رسالة إلكترونية للاعتذار عن عدم قدرتهم على تلبية طلبه. شعر كلوغ بخيبة أمل، وبقدر مساوٍ من الارتياح أيضاً على الأرجح، وراسل الشركة على أمل أن تفي أمازون بوعدها بمنح حسم 1% على المشتريات التي تتمّ عبر الموقع باستخدام بطاقة ائتمان أمازون الخاصّة به.

انهيار مفاجئ

لا تصعد الدوّامات السعرية الخوارزمية، كتلك التي عانت منها أمازون، دائماً نحو الأعلى. إذا سبق أن استثمرتم في البورصة، أو حتّى وضعتم بعض المدّخرات في حساب مرتبط بها، فلا شكّ أنّكم سمعتم اللازمة المألوفة «من شأن الاستثمارات أن تنخفض أو ترتفع». تتمّ إدارة التداول في البورصة بشكل متزايد من خلال ما يسمّى التجارة الخوارزمية. إذ بإمكان أجهزة الكمبيوتر أن تستجيب لتغيّرات السوق في جزء من الوقت الذي يستغرقه الإنسان. هكذا، إذا ظهرت طلبيّة كبيرة لبيع منتج مالي معيّن على الشاشة، فقد يشير ذلك إلى أنّ سعر هذا المنتج ينخفض وأنّ التجّار يأملون في التخلّص من أصولهم بسعر جيّد قبل أن ينخفض السعر أكثر. وفي الوقت الذي يستغرقه الإنسان لقراءة الرسالة والضغط على الزر لبيع أصوله، تكون خوارزميّات التداول عالية التردّد قد باعت ما لديها وانخفض السعر بشكل كبير. وليس بإمكان التجّار البشر المنافسة. وتشير التقديرات إلى أنّ 70% من التداول في وول ستريت يتمّ التعامل معه حاليّاً بواسطة ما يسمّى بآلات الصندوق الأسود. ولهذا السبب، يتحوّل تجّار المدن الكبرى والمصارف بشكل متزايد إلى خرّيجي الرياضيات والفيزياء، بدلاً من الوسطاء، للمساعدة في كتابة، وربّما الأهمّ من ذلك، في فهم تلك البرامج التجارية الخوارزمية.

نحو الساعة 14:30 من 6 مايو 2010، بعد يوم تداول سيّئ أساساً، انخفض فيه مؤشّر داو جونز أكثر من 300 نقطة، قام تاجر القطع، نافندر ساراو، الذي يعمل من غرفة نومه في لندن، بتشغيل الخوارزميّة المفصّلة التي انتهى مؤخّراً من تعديلها. كانت خطّته تقضي بكسب الكثير من المال بسرعة كبيرة عن طريق خداع السوق - ممّا يجعل التجّار الآخرين يعتقدون ويتصرّفون على أساس اتّجاه سوق غير موجود فعلاً. وكان برنامجه مصمّماً لوضع أوامر بسرعة لبيع عقود آجلة مصغّرة، ومن ثمّ إلغاء أمر البيع قبل أن يتمكّن أيّ شخص من شرائها.

هكذا، عرض بيع عقوده بسعر أعلى بقليل من السعر الأفضل الحالي، لكي يضمن عدم إغراء أحد، ولا حتّى خوارزميّة سريعة المفعول، بقبول العرض قبل أن تتمكّن خوارزميّته من إلغائه. عندما نفّذ البرنامج، عمل كالسحر. فقد تعرّفت خوارزميّات التداول عالية التردّد على عدد كبير من أوامر البيع الواردة وقرّرت بيع عقودها الآجلة المصغّرة قبل انخفاض السعر - كما كان ليحدث حتماً لو أُشبعت السوق بكلّ المبيعات. في غضون 14 ثانية فقط، تداولت الخوارزميّات بأكثر من 27,000 عقد آجل مصغّر، تمثّل 50% من إجمالي حجم التداول لذلك اليوم. وخلال ذلك، انهارت أسعار العقود الآجلة إلى حدّ أرضى ساراو. فقام بإيقاف تشغيل برنامجه واشترى العقود التي أصبحت رخيصة الثمن الآن. عندئذٍ شعرت برامج التداول الخوارزمية بنقص المبيعات، فاستعادت الثقة بسرعة واشترت العقود الآجلة، ممّا سمح للسعر بالارتفاع مجدّداً. وهكذا حقّق ساراو مكسباً هائلاً.

تشير التقديرات إلى أنّ ساراو حقّق في ذلك اليوم ربحاً بمقدار 40 مليون دولار. فقد كانت خوارزميته ناجحة للغاية، لا بل على نحو ساحق في الحقيقة. وعندما اكتشفت الخوارزميّات أحجام المبيعات العالية في سوق العقود الآجلة، الذي تسبّب بها ضرب الاحتيال، بدأت ببيع أنواع أخرى من العقود الآجلة لتخفيف المزيد من الخسائر. امتدّت آثار ذلك البيع إلى الأسهم ومنها إلى السوق الأوسع. وخلال الدقائق الخمسة بين الساعة 14:42 و14:47، انخفض مؤشّر داو جونز 700 نقطة تقريباً، ليصل إجمالي العجز لذلك اليوم إلى نحو 1000 نقطة، وهو أكبر انخفاض يحدث في يوم واحد في تاريخ المؤشّر، ليزيل بذلك تريليون دولار من السوق. وربّما لم تكن خوارزميّات التداول عالية التردّد هي المسؤولة عن الانهيار، لكنّ تداولها السريع غير المدروس هو الذي أدّى إلى تفاقم الوضع. لكن بمجرّد تحسّن السوق وعودة الثقة الخوارزمية، كانت هي المسؤولة أيضاً عن إعادة التعديل السريع لمعظم الأسهم لتستعيد قيمها الافتتاحية تقريباً.

نجا ساراو من العدالة لخمس سنوات تقريباً، بينما ألقى المسؤولون الماليون الأمريكيون باللائمة على مجموعة كبيرة من العوامل الأخرى لذلك الانهيار المفاجئ. لكن في عام 2015، تمّ اعتقاله وتسليمه للولايات المتّحدة. فأقرّ أنّه مذنب بالتلاعب غير القانوني بالسوق، وواجه عقوبة السجن لمدّة 30 عاماً، بالإضافة إلى اضطراره لسداد الأموال التي كسبها من خلال تجارته غير القانونية. على ما يبدو، حتّى الجريمة الخوارزميّة لا تمرّ من دون عقاب.

أخبار رائجة

يوضح تلاعب ساراو بالسوق من غرفة نومه مدى سهولة استخدام الخوارزميّات لأغراض خبيثة. فغالباً ما نصوّرها ببساطة على أنّها تسلسلات محايدة من الإرشادات التي يمكن اتّباعها بهدوء، متناسين أنّ جميع الخوارزميّات يتمّ تطويرها لسبب ما. فلمجرّد أنّ القواعد نفسها محدّدة مسبقاً ويمكن تنفيذها بشكل محايد، غير أنّ ذلك لا يعني أنّ الغرض هو العمل غير المنحاز، حتّى لو كانت الحيادية هي النيّة الأصليّة لمصمّم الخوارزميّة.

يستخدم تطبيق تويتر، الذي غالباً ما يوصف أنّه حصن الشفافية بين منصّات وسائل التواصل الاجتماعية، خوارزميّة واضحة نسبيّاً لتحديد المواضيع الرائجة. تبحث الخوارزميّة عن طفرات حادّة في استخدام الهاشتاغ عوضاً عن الترويج للمواضيع على أساس الحجم الكبير فقط. ويبدو هذا منطقياً: النظر إلى التسارع بدلاً من مجرّد معدّل الاستخدام يسمح لأحداث قصيرة ومهمّة في آن، مثل طلب متبرّعين بالدم (#تبرّع_بالدم) أو تقديم مأوى خلال الليل (# مأوى) في أعقاب الهجمات الإرهابية المنسّقة لعام 2015 في باريس، أن ترتفع بسرعة لتحتلّ الصدارة. ولو كان حجم التداول الكبير هو المعيار الوحيد للأخبار الرائجة، فما كنّا لنسمع أبداً عن شيء آخر سوى هاري ستايلز (#harrystyles) ولعبة العروش (#GoT).

لسوء الحظّ، تعني هذه المجموعة نفسها من القواعد أنّ الموضوعات الاجتماعية التي تبني ببطء نادراً ما تصعد إلى مركز الصدارة الذي قد تستحقّه. ففي شهري سبتمبر وأكتوبر من عام 2011، طوال فترة «احتلوا وول ستريت»، لم يتمّ تداول الهاشتاغ #occupywallstreet أبداً في مدينة نيويورك التي تعتبر مدينة الحركة الأصلية على الرغم من أنّ الهاشتاغ كان الأكثر شعبية خلال تلك الفترة على تويتر. بالمقابل، لاقت قصص عابرة وأقلّ حجماً خلال تلك الفترة، مثل وفاة ستيف جوبز (#ThankYouSteve) أو زواج كيم كارداشيان (#KimKWedding)، اهتماماً

أكبر لتسلّق سلّم تصنيفات تويتر الأكثر تداولاً. بالتالي، يجدر بنا أن نتذكّر أنّه حتّى الخوارزميّات البراغماتية حقّاً يمكن أن تشتمل على تحيّزات مشفّرة بداخلها تؤثّر على اتّجاه تسليط الضوء على الساحة العالمية.

ثمّة حالات قد تدعو أكثر إلى القلق تكون فيها نتائج خوارزميّات مستقلّة في الظاهر عرضة للتدخّل البشري. ففي مايو 2016، اتُّهم قسم الأخبار «الأكثر تداولاً على فايسبوك» بالتحيّز ضدّ المحافظين في مقالة على موقع أخبار تكنولوجيا، غيزمودو. استمع غيزمودو إلى شهادة من منسّق أخبار سابق في فايسبوك ادّعى أنّ قصصاً يمينية عن شخصيات سياسية أميركية مثل ميت رومني وراند بول، من بين آخرين، يتمّ إخفاؤها عن قائمة فايسبوك للمواضيع الأكثر تداولاً عن طريق التدخّل البشري. وحتّى عندما يتمّ تداول قصص للمحافظين على فايسبوك، فقد زُعم أنّها لم تكن تصل إلى قائمة المواضيع الأكثر تداولاً. في حالات أخرى، زُعم أنّ قصصاً تمّ «حقنها» بشكل اصطناعي في قائمة المواضيع الأكثر تداولاً حتّى لو لم تكن رائجة بما فيه الكفاية لتستحقّ الإدراج.

في استجابة على اتّهامات التحيّز السياسي، قرّرت إدارة فايسبوك طرد فريق التحرير الخاصّ بالمواضيع الأكثر تداولاً و«جعل المنتج أكثر آليّة». فبمنح الخوارزميّة مزيداً من السلطة وإزالة درجة من التحكّم البشري، أمِلت إدارة فايسبوك أن تلعب على إدراك الموضوعية الخوارزميّة. وبعد ساعات قليلة من ذلك القرار، كان قسم الموضوعات الأكثر تداولاً يروّج لقصّة إخبارية مزيّفة من الجناح اليميني تفيد أنّ مذيعة قناة فوكس نيوز ميغن كيلي، الليبرالية سرّاً، قد طُردت بسبب دعمها المزعوم لهيلاري كلينتون. وكان هذا مجرّد أوّل وابل من القصص الإخبارية المزّيفة ذات التوجّه اليميني التي ميّزت قسم المواضيع الأكثر تداولاً في فايسبوك على مدار العامين التاليَين، ممّا جعل مزاعم التحيّز ضدّ المحافظين تبدو لطيفة بالمقارنة. وفي نهاية المطاف، دفعت قضيّة الموثوقية إدارة فايسبوك إلى إلغاء منصّة الأخبار الأكثر تداولاً تماماً في يونيو 2018.

* * *

نحن نضع ثقتنا في خوارزميّات يُفترض أنّها غير متحيّزة لأنّنا نخشى التناقضات والميول البشرية الواضحة. ولكن على الرغم من أنّ أجهزة الكمبيوتر قد تنفّذ الخوارزميّات بطريقة موضوعيّة باتّباع مجموعة من القواعد المحدّدة مسبقاً، إلّا أنّ القواعد نفسها مكتوبة بيد البشر. ومن شأن هؤلاء المبرمجين أن يشفّروا تحيّزاتهم، سواء عن وعي أو عن غير وعي، في الخوارزمية نفسها مباشرة، ممّا يؤدّي إلى التعتيم على تحيّزاتهم من خلال ترجمتها إلى رموز الكمبيوتر. ولا

يمكننا حقّاً الركون إلى فكرة حياديّة قصصهم الإخبارية الأكثر تداولاً لأنّ فايسبوك، إحدى أهمّ شركات التكنولوجيا في العالم، قد تنازلت عن السلطة لإحدى الخوارزميّات التي ابتكرتها بنفسها.

على نحو مشابه لقمصان سوليد غولد بومب المثيرة للاستفزاز وأسعار أمازون المتصاعدة، تُبرز مصاعب فايسبوك الحاجة إلى مزيد من الإشراف البشري، وليس العكس. فعندما تزداد الخوارزميّات تعقيداً، يمكن أن تصبح مخرجاتها غير متوقّعة وتحتاج إلى الضبط بمزيد من التدقيق. لكنّ هذا التدقيق ليس المسؤولية الوحيدة لعمالقة التكنولوجيا. فبما أنّ خوارزميّات التحسين تتغلغل على نحو متزايد في جوانب حياتنا اليومية، علينا نحن المستخدمون لمثل هذه الاختصارات، والموجودون في الخطوط الأمامية، تحمّل جزء من المسؤوليّة لضمان صحّة المخرجات التي نستفيد منها. هل نثق بمصدر الأخبار التي نقرأها؟ هل الطريق الذي يقترحه نظام الملاحة منطقي؟ هل نعتقد أنّ السعر الآلي الذي يُطلب منا دفعه يمثّل القيمة الحقيقية للسلعة؟ على الرغم من أنّ الخوارزميّات يمكن أن تزوّدنا بمعلومات تسهّل اتّخاذ القرارات الحيوية، إلّا أنّها في نهاية المطاف ليست بديلاً عن أحكامنا الخفيّة والمتحيّزة وغير المنطقية، التي تبقى في النهاية بشرية.

عندما نتحرّى الأدوات الموجودة في طليعة المعركة ضدّ الأمراض المعدية في الفصل التالي، سنجد أنّ الرسالة نفسها تصحّ هنا أيضاً: على الرغم من أنّ التقدّم في الطبّ الحديث قطع شوطاً طويلاً نحو وقف انتشار الأمراض المعدية، تُظهر الرياضيات أنّه من بين أكثر الطرق فاعلية للحدّ من انتشار الأوبئة هي الإجراءات والخيارات البسيطة التي نتّخذها كأفراد.

7

عرضة للعدوى، مُعدٍ، مستبعد:
احتواء الأمراض في أيدينا

خلال عطلة عيد الميلاد في نهاية عام 2014، أصبح «أسعدُ مكانٍ على سطح الأرض» مصدر بؤس للعديد من الأسر. فقد زار مئات الآلاف من الآباء والأمّهات والأطفال مدينة ديزني لاند بولاية كاليفورنيا خلال العطلة، على أمل الاحتفاظ بذكريات سحرية ستستمرّ لمدى الحياة. لكن بدلاً من ذلك، غادر بعضهم مع ذكرى لم يتوقّعوها: مرض شديد العدوى.

كان موبيوس لوب البالغ من العمر أربعة أشهر أحد أولئك الزوّار. إذ كانت والدته، أريبل، ووالده، كريس، من هواة ديزني لاند المخلصين، لدرجة أنّهما تزوّجا هناك في عام 2013. وبما أنّ أريبل ممرّضة مُدرَّبة، فقد كانت تدرك تماماً مخاطر تعريض النظام المناعي لابنها المولود قبل الأوان للأمراض المعدية. لذلك أبقت مولودها الجديد حبيس المنزل تقريباً. وأصرّت على ألاّ يقترب من موبيوس قبل انتهاء جولة تطعيماته الأولى عند سنّ الشهرين إلاّ أشخاص جدّدوا لقاحات الأنفلونزا الموسمية والكزاز والخناق والسعال الديكي.

في منتصف يناير 2015، ومع استكمال موبيوس الجولة الأولى من اللقاحات، قرّر أريبل وكريس اصطحابه لكي يتعرّف على سحر ديزني لاند. وبعد يوم قضوه في مشاهدة الاستعراضات ومقابلة شخصيّات الرسوم المتحركة بالحجم الطبيعي، عاد الزوجان إلى منزلهما وهما مسروران بمدى استمتاع موبيوس بأولى مغامراته في ديزني.

بعد أسبوعين، وبعد ليلة كافحت فيها أريبل لحمل ابنها على النوم، لاحظت علامات حمراء على صدره وعلى مؤخّر رأسه. وعندما أخذت حرارته، وجدت أنّه يعاني من ارتفاع في الحرارة بلغت 39 درجة مئوية. لم تتمكّن أريبل من خفض حرارة موبيوس، فاتّصلت بالطبيب الذي طلب منها نقل الطفل مباشرة إلى غرفة الطوارئ. عندما وصلوا، استقبلهم فريق طبّي خارج المستشفى من فرقة مكافحة العدوى كانوا يرتدون ملابس واقية كاملة. أعطيت أريبل وكريس قناعَين ورداءَين وتمّ نقلهم عبر المدخل الخلفي إلى غرفة عزل بضغط سلبي. بمجرّد دخول موبيوس إلى المستشفى،

قام الأطبّاء بفحصه بعناية، قبل أن يطلبوا من أرييل إمساكه لكي يسحبوا منه عيّنة دم من أجل إجراء اختبار حاسم. مع أنّ موظّفي غرفة الطوارئ لم يروا حالة مشابهة من قبل، إلّا أنّهم اشتبهوا بالحالة نفسها: الحصبة.

نظراً لفاعلية برامج التلقيح التي بدأت في ستّينيات القرن الماضي، فإنّ قلّة من مواطني الدول الغربية، بما في ذلك العديد من المهنيين الطبّيين، قد شهدوا بشكل مباشر حدّة أعراض الحصبة. لكن بمجرّد السفر إلى البلدان الأقلّ نموّاً مثل نيجيريا، التي تشهد بشكل روتيني حالات حصبة سنوية تصل إلى عشرات الآلاف، فإنّنا نحصل على صورة أفضل للمرض، الذي تشتمل مضاعفاته على الالتهاب الرئوي والتهاب الدماغ والعمى وحتّى الموت.

في العام 2000، تمّ الإعلان عن القضاء على الحصبة رسميّاً في جميع أنحاء الولايات المتّحدة. ويعني ذلك أنّها لم تعد منتشرة بشكل مستمرّ في البلاد وأنّ أيّ حالات جديدة كانت نتيجة لتفشّي الأمراض الناجمة عن أشخاص عائدين من الخارج. وفي السنوات التسع بين عام 2000 و2008، كان ثمّة 557 حالة مؤكّدة فقط من الحصبة في الولايات المتّحدة. لكن في عام 2014 وحده، ظهرت 667 حالة[124]. ومع اقتراب عام 2015، انتشر المرض الذي تفشّى في ديزني لاند، وأصاب عشرات الأسر الأخرى غير أسرة لوب، بصورة سريعة في جميع أنحاء البلاد. وبحلول الوقت الذي تمّ القضاء فيه على الوباء، كان قد أصاب أكثر من 170 شخصاً في 21 ولاية. وتُعتبر حادثة انتشار المرض في ديزني جزءاً من نزعة لدى الأوبئة للتفشّي على نطاق واسع على نحو متزايد. وتُعتبر الحصبة من الأمراض التي تعود للظهور مجدّداً في الولايات المتّحدة وأوروبا، معرّضة الأشخاص الضعفاء للخطر.

* * *

أصابت الأمراض البشر منذ أن انحرف الهومينيني عن الشمبانزي والبونوبو. إذ يحتوي جزء كبير من قصّة تاريخنا على الحبكة الفرعية غير المكتوبة في كثير من الأحيان للأمراض المعدية التي نمرّ بها. فعلى سبيل المثال، اكتُشف مؤخّراً أنّ الملاريا والسلّ قد أصابا شرائح كبيرة من المصريين القدماء منذ أكثر من 5000 عام. ومن عام 541 إلى 542م، يقدَّر أنّ الوباء العالمي المعروف باسم «طاعون جستنيان" قد قضى على 15-25% من سكّان العالم البالغ عددهم 200 مليون نسمة. وبعد غزو كورتيس للمكسيك، انخفض عدد السكّان الأصليين من نحو 30 مليون في

عام 1519 إلى 3 ملايين فقط بعد 50 عاماً. إذ لم يكن لدى أطبّاء الأزتك قدرة على مقاومة الأمراض التي لم يروها سابقاً والتي جلبها معهم الغزاة من الغرب. والقائمة تطول.

حتّى اليوم، في حضارتنا المتقدّمة طبّياً، لا تزال مسببّات الأمراض معقّدة بما فيه الكفاية بحيث لم يتمكّن الطبّ الحديث من إزالتها من حياتنا اليومية. إذ يعاني معظم الناس من تفشّي الزكام كلّ عام تقريباً. وإذا لم تكونوا قد أصبتم أنتم شخصياً بالأنفلونزا، فلا بدّ أنّكم تعرفون كثيراً من الأشخاص الذين أصيبوا بها. وصحيح أنّ عدداً أقلّ من الأشخاص في العالم المتقدّم سيصابون بالكوليرا أو السلّ، لكنّ هذه الأمراض الوبائية ليست غير شائعة في معظم أرجاء أفريقيا وآسيا. ولكنّ المثير للاهتمام أنّه حتّى داخل المجتمعات التي ترتفع فيها معدّلات انتشار الأمراض، فإنّ الإصابة بالمرض ليست أكيدة. ذلك أنّ جزءاً من افتتاننا بالأمراض يرجع إلى عشوائيّتها الظاهرية، حيث إنّها تُحدث أهوالاً لدى البعض، بينما لا تمسّ آخرين يعيشون في المجتمع نفسه.

مع ذلك، ثمّة مجال علمي معروف ولكنّه ناجح للغاية يعمل في الخلفية لكشف أسرار الأمراض المعدية. من خلال اقتراح تدابير وقائية لوقف انتشار فيروس نقص المناعة البشرية، ووضع حدّ لأزمة الإيبولا، يلعب علم الأوبئة الرياضي دوراً حاسماً في مكافحة العدوى على نطاق واسع. فمن تسليط الضوء على المخاطر التي تعرّضنا لها الحركة المضادّة للتلقيح المتزايد، إلى محاربة الأوبئة العالمية، تكمن الرياضيات في صميم تدخّلات الحياة والموت الحاسمة التي تسمح لنا بمحو الأمراض عن سطح الأرض.

آفة الجدري

بحلول منتصف القرن الثامن عشر، كان مرض الجدري مستوطناً في جميع أنحاء العالم. فبحسب التقديرات، كان المرض يقضي سنويّاً على 400,000 شخص في أوروبا وحدها، أي ما يصل إلى 20% من وفيات القارّة. وكان نصف أولئك الذين ينجون من المرض، يصابون بالعمى والتشوّه. عمل إدوارد جينر طبيباً في منطقة غلوسيسترشاير الريفية، وكان شاهداً على الاعتقاد السائد لدى مرضاه أنّ التحوّل إلى حلّابة بقر يمكن أن يحمي من مرض الجدري. فاستنتج جينر أنّ مرض جدري البقر الخفيف الذي تتعرّض له معظم الحلّابات يوفّر لهنّ بعض المناعة ضد مرض الجدري.

للتحقّق من فرضيّته، قام جينر في عام 1796 بتجربة رائدة في مجال الوقاية من الأمراض والتي تُعتبر اليوم غير أخلاقية[125]. إذ استخرج القيح من بثرة على ذراع حلّابة بقر مصابة بجدري البقر، وحقنها في ذراع صبيّ يبلغ من العمر ثماني سنوات يدعى جيمس فيبس. سرعان ما أصيب الصبيّ بالحمّى والبثور، ولكن في غضون 10 أيّام عاد ليقف على قدميه، وهو بكامل صحّته كما كان في السابق. وكما لو أنّ ذلك الاختبار لم يكن كافياً، عمد جينر بعد شهرين إلى حقن فيبس مجدّداً، ولكن هذه المرّة بمرض الجدري الأكثر خطورة. وبعد مرور بضعة أيّام، عندما لم تظهر أعراض الجدري على فيبس، استنتج جينر أنّ الصبيّ أصبح محصّناً ضدّ المرض. أطلق جينر على تلك العمليّة اسم «لقاح vaccination»، المشتقّة من الكلمة اللاتينية *vaccus*، وتعني بقرة. وفي عام 1801، دوّن جينر آماله بشأن هذا الاكتشاف «... أنّ القضاء على مرض الجدري، وهو البلاء الأكثر فظاعة الذي يعانيه الجنس البشري، يجب أن يكون النتيجة النهائية لهذه الممارسة». في النهاية، وبعد جهود التلقيح المنسّقة من قبل منظّمة الصحّة العالمية بعد ما يقرب من 200 عام، أيّ في عام 1977، أصبح حلمه حقيقة.

توفّر قصة تطوير جينر للقاحات رابطاً لا يمكن محوه بين الجدري وتاريخ الوقاية من الأمراض الحديثة. ويجد علم الأوبئة الرياضي جذوره أيضاً في محاولة تقليص انتشار الجدري، لكنّ أصول الموضوع ترجع إلى أبعد من جينر.

* * *

قبل فترة طويلة من تطوير جينر لفكرة اللقاح، مارست شعوب الهند والصين عمليّة التجدير في محاولة يائسة لإنقاذ نفسها من الإصابة المتزايدة بالجدري. على النقيض من التلقيح، ينطوي التجدير على التعرّض لكمّية صغيرة من المواد المرتبطة بالمرض نفسه. في حالة الجدري، غالباً ما كان يتمّ نفخ مسحوق قشور بثور ضحايا سابقين في الأنف أو إدخال القيح في شقّ في الذراع. والهدف من ذلك هو إحداث شكل أخفّ من مرض الجدري، وإن يكن لا يزال مزعجاً للمصاب، إلّا أنّه أقلّ خطورة بكثير ويوفّر للمريض مناعة مدى الحياة من الأعراض الشديدة للمرض الأصلي الكامل. سرعان ما انتشرت هذه الممارسة في الشرق الأوسط ومنه إلى أوروبا في أوائل القرن الثامن عشر، وكان الجدري في ذلك الحين واسع الانتشار.

على الرغم من فاعليّة هذه الممارسة، إلّا أنّه كان لها منتقدوها. ففي بعض الحالات، كان التجدير يفشل في حماية المريض من إصابة ثانية أكثر خطورة من مرض الجدري مع تراجع

مناعته. وربّما كان الأكثر ضرراً لسمعة التجدير هي نسبة 2% من الحالات التي يتوفّى فيها المرضى نتيجة العلاج. فقد كانت وفاة أوكتافيوس، ابن الملك الإنكليزي جورج الثالث، والبالغ من العمر أربع سنوات، إحدى هذه الحالات البارزة، والتي لم تسهم بتحسين رأي الناس بهذه الممارسة. وعلى الرغم من أنّ معدّل الوفيات البالغ 2% كان لا يزال أقلّ بكثير من نسبة 20-30% المرتبطة بالانتشار الطبيعي للأمراض، إلّا أنّ النقّاد جادلوا أنّ كثيراً من المرضى الذين تعرّضوا لعمليّة التجدير ربّما ما كانوا ليصابوا إطلاقاً بالجدري بشكل طبيعي وأنّ العلاج على نطاق واسع شكّل عامل خطر غير ضروري. لوحظ أيضاً أنّ المرضى الذين أُخضعوا للتجدير بإمكانهم نشر المرض الكامل بالفاعليّة نفسها التي ينتشر بها المرض عبر ضحايا الجدري طبيعيّاً. لكن في غياب التجارب الطبّية الخاضعة للرقابة، لم يكن من السهل التوصّل إلى القياس الكمّي لتأثير التجدير وإزالة الشكوك حيال هذا الإجراء.

كان هذا بالضبط هو نوع قضايا الصحّة العامّة التي أثارت اهتمام عالم الرياضيات السويسري دانييل بيرنولي، أحد أهمّ الأبطال العلميين غير المعروفين في القرن الثامن عشر. فمن بين إنجازاته الرياضية العديدة، أدّت دراساته في ديناميات الموائع إلى اقتراح معادلات تقدّم شرحاً لكيفيّة تمكّن الأجنحة من تحقيق الرفع المطلوب للسماح للطائرات بالطيران. لكن قبل أن يتقن بيرنولي الرياضيات المتقدّمة، نال درجته الجامعية الأولى في الطبّ. وأدّت دراساته اللاحقة في تدفّق السوائل، إلى جانب معرفته الطبّية، إلى اكتشاف الإجراء الأوّل الذي يمكن استخدامه لقياس ضغط الدم. فعن طريق إحداث ثقب في جدار أنبوب مع قناة مجوّفة، استطاع بيرنولي تحديد ضغط السائل الذي يمرّ عبر الأنبوب من خلال النظر إلى مدى ارتفاعه في القناة. وتضمّنت الممارسة المزعجة التي نشأت من اكتشافاته إدخال أنبوب زجاجي مباشرة في شريان المريض. ولم يتمّ استبدال هذه الطريقة ببديل أقلّ توغّلاً إلّا بعد أكثر من 170 عاماً[126]. أدّت خلفيّة بيرنولي الأكاديمية الواسعة به أيضاً إلى تطبيق منهج رياضي لتحديد الفاعليّة العامّة لعمليّة التجدير، وهو سؤال لم يتمكّن الأطبّاء التقليديون من الإجابة عنه بشكل مؤكّد.

اقترح بيرنولي معادلة لتحديد نسبة أشخاص ينتمون إلى سنّ معيّنة لم يصابوا بالجدري قطّ، وهم بالتالي لا يزالون عرضة للمرض[127]. وقام بمعايرة معادلاته مع جدول حياة، جمعه إدموند هالي (الشهير باكتشافه للمذنّب)، حدّد نسبة المواليد الأحياء الباقين على قيد الحياة إلى أيّ عمر معيّن. وهكذا تمكّن من حساب نسبة الأشخاص الذين أصيبوا بالمرض وتعافوا، فضلاً عن نسبة الأشخاص الذين توفّوا. ومع معادلة ثانية، تمكّن بيرنولي من حساب عدد الأرواح التي سيتمّ إنقاذها

إذا تمّت ممارسة التجدير بشكل روتيني على جميع السكّان. فخلص إلى أنّه مع التجدير العالمي، سيعيش نحو 50% من المواليد الجدد حتّى بلوغ سنّ الـ 25. ومع أنّ هذا الأمر يبدو محبطاً بمعايير اليوم، إلّا أنّه شكّل حينذاك تحسّناً ملحوظاً مقارنة بنسبة 43% لو سُمح للجدري باجتياح السكّان بحرّية. ولعلّ الأمر الأكثر أهمّية أنّه أظهر أنّ هذا التدخّل الطبّي البسيط والوحيد لديه القدرة على رفع متوسّط العمر المتوقّع بأكثر من ثلاث سنوات. بالنسبة إلى بيرنولي، كانت فائدة التدخّل الطبّي من قبل الدولة واضحة. وفي ختام بحثه، كتب قائلاً: «أتمنّى ببساطة، في مسألة تهمّ عن كثب رفاه الجنس البشري، ألّا يتمّ اتّخاذ قرار بمعزل عن المعرفة التي يمكن أن يوفّرها قليل من التحليل والحساب».

اليوم، لم ينحرف هدف علم الأوبئة الرياضية عن أهداف بيرنولي الأصلية. فمن خلال النماذج الرياضية الأساسيّة، يمكننا البدء بتوقّع تطوّر الأمراض وفهم تأثير التدخّلات المحتملة على انتشار المرض. ومن خلال نماذج أكثر تعقيداً، يمكننا البدء بالإجابة على الأسئلة المتعلّقة بالتخصيص الأكثر كفاءة للموارد المحدودة، أو تجنّب العواقب غير المتوقّعة لبعض تدخّلات الصحّة العامّة.[128]

نموذج S-I-R (عرضة للعدوى، ناقل للعدوى، مستبعد)

في نهاية القرن التاسع عشر، أدّى سوء الصرف الصحّي وبيئات المعيشة المزدحمة في الهند الاستعمارية إلى سلسلة من الأوبئة الفتّاكة، بما في ذلك الكوليرا والجذام والملاريا، التي اجتاحت البلاد وقتلت الملايين. إلّا أنّ تفشّي مرض رابع، لطالما بثّ اسمه الرعب لمئات السنين، سيؤدّي إلى أحد أهمّ التطوّرات في تاريخ علم الأوبئة.

ما من أحد يستطيع أن يؤكّد تماماً كيف وصل المرض إلى بومباي في أغسطس من عام 1896، لكن ما من شكّ في الدمار الذي أحدثه[129]. ويبدو التفسير الأرجح أنّ سفينة تجارية، تؤوي عدداً من الركّاب المتخفّين غير المرغوب فيهم إطلاقاً، أبحرت من مستعمرة هونغ كونغ البريطانية. بعد أسبوعين، رست السفينة في ميناء تراست في بومباي (مومباي الآن). وبينما كان العمّال منشغلين في تفريغ حمولة السفينة في حرارة تبلغ 30 درجة، هبط عدد من الركّاب المتخفّين من دون أن يلاحظهم أحد، وأسرعوا باتّجاه الأحياء الفقيرة من المدينة. كان أولئك المسافرون الذين قدموا مجّاناً يؤوون هم أنفسهم شحنة غير مرغوب فيها، ستبعث الفوضى أوّلاً في بومباي، ومن ثمّ

في بقيّة أرجاء الهند. في الواقع، كان الركّاب المتخفّون عبارة عن جرذان تحمل البراغيث المسؤولة عن انتشار بكتيريا *يرسينيا بيستيس* (Yersinia pestis): الطاعون.

تمّ اكتشاف أولى حالات الإصابة بالطاعون بين أهالي بومباي في منطقة ماندفي المحيطة بالميناء. انتشر المرض بلا قيود في أرجاء المدينة، وبنهاية عام 1896، كان يقضي على 8000 شخص شهريّاً. ومع بداية عام 1897، امتدّ الطاعون إلى بونا القريبة ولاحقاً إلى جميع أنحاء الهند. وبحلول شهر مايو من عام 1897، أدّت تدابير الاحتواء الصارمة إلى إيقاف الوباء. غير أنّ المرض سيعود بشكل دوري ليطارد الهند على مدى السنوات الثلاثين المقبلة، مودياً بحياة أكثر من 12 مليون من مواطنيها.

* * *

خلال تلك الفترات التي تفشّى فيها الطاعون، وصل طبيب عسكري اسكتلندي شابّ يدعى أندرسون مكيندريك، في عام 1901. سيقضي مكيندريك نحو 20 عاماً في الهند لإجراء الأبحاث (في الفصل 1، رأينا أنّ مكيندريك كان العالِم الأوّل الذي أثبت أنّ البكتيريا تتكاثر وصولاً إلى قدرة استيعابية معيّنة، وفقاً لنموذج النموّ اللوجستي)، وتدخّلات الصحّة العامّة، واكتساب فهم أعمق للأمراض حيوانية المنشأ، مثل أنفلونزا الخنازير، التي يمكن أن تنتشر بين الحيوانات والبشر. ولاحقاً، بفضل براعته في كلّ من البحث والممارسة، سيصبح رئيساً لمعهد باستور في كاسوالي. لكن من المفارقات أنّه بينما كان في كاسوالي، أصيب بمرض البروسيلات، وهو مرض يسبّب الضعف وينتج عن شرب الحليب غير المبستر. ونتيجة لذلك، تمّ إرساله في عدّة إجازات طبّية إلى وطنه في اسكتلندا.

في إحدى تلك الإجازات، استلهم من لقاء سابق مع زميل له في الخدمة الطبّية في الهند وفائز بجائزة نوبل، السير رونالد روس، وقرّر دراسة الرياضيات. وستهيمن الدراسة والأبحاث الرياضية على السنوات الأخيرة من إقامة مكيندريك في الهند، قبل أن يتمّ صرفه نهائيّاً في عام 1920، بعد إصابته بمرض الأمعاء المداري.

عندما عاد مكيندريك إلى اسكتلندا، تولّى منصب المشرف على مختبر الكلّية الملكية للأطباء في إدنبرة. وهناك، التقى بعالم كيمياء شابّ وموهوب يدعى ويليام كيرماك. لم يمضِ وقت طويل على هذا اللقاء حتّى أصيب كيرماك بجروح في انفجار مدمّر تسبّب له على الفور بالعمى الدائم. لكن على الرغم من هذه النكسة، ازدهرت شراكته مع مكيندريك. فاستناداً إلى البيانات عن تفشّي

الطاعون في بومباي، والتي جمعها مكيندريك أثناء وجوده في الهند، أجريا الدراسة الأكثر تأثيراً في تاريخ علم الأوبئة الرياضي[130].

استنتج العالِمان معاً أحد النماذج الرياضية الأقدم والأبرز عن انتشار المرض. لتطبيق نموذجهما، قسّما السكّان إلى ثلاث فئات أساسيّة وفقاً لحالة المرض. إذ تمّ تصنيف الأشخاص الذين لم يصابوا بالمرض بعد، على أنّهم «عرضة للعدوى». وافتُرض أنّ كلّ الأشخاص يولدون معرّضين للعدوى وقادرين على التقاطها. وصُنّف الأشخاص الذين أصيبوا بالمرض وباتوا قادرين على نقله إلى الأشخاص العرضة له على أنّهم «ناقلون للعدوى». أمّا المنتمون إلى المجموعة الثالثة فسُمّوا «مستبعدين». عموماً، كان المستبعدون هم الأشخاص الذين أصيبوا بالمرض وتعافوا منه واكتسبوا المناعة ضدّه أو توفّوا نتيجة له. وأولئك «المستبعدون» ما عادوا يساهمون في انتشار المرض. ويشار إلى هذا التمثيل الرياضي الكلاسيكي لانتشار المرض باسم نموذج S-I-R.

في البحث، أظهر كلّ من كيرماك ومكيندريك فائدة نموذج S-I-R من خلال الإثبات أنّه قادر على إعادة إنشاء عمليّة انتشار وانحسار عدد من حالات الطاعون عندما تفشّى في عام 1905 في بومباي[131] بشكل دقيق. وخلال تسعين عاماً من إنشاء هذا النموذج (ومشتقّاته)، حقّق نجاحاً كبيراً في وصف جميع أنواع الأمراض الأخرى. من حمّى الضنك في أميركا اللاتينية، إلى حمّى الخنازير في هولندا، والنوروفيروس في بلجيكا، وفرّ نموذج S-I-R دروساً حيوية للوقاية من الأمراض.

الحضور الشكلي، والتوقّعات، ومشكلة الطاعون

في السنوات الأخيرة، ساهم ظهور عقود ساعة الصفر وزيادة العمالة المؤقّتة - وهي السمة المميّزة لاقتصاد «الأعمال الحرّة Gig economy» المزدهر - في ارتفاع عدد الأشخاص الذين يأتون إلى العمل أثناء المرض. على الرغم من أنّ التغيّب غير المبرّر كان موضوع بحث مستفيض، غير أنّنا لم نبدأ بفهم تكاليف «الحضور الشكلي» إلّا مؤخراً. إذ توصّلت الدراسات التي جمعت بين النمذجة الرياضية وبيانات الحضور في مكان العمل إلى بعض الاستنتاجات المذهلة. تتسبّب التدابير المعتمدة للحدّ من غياب الموظّف، بما في ذلك تقليص الإجازات المرضية مدفوعة الأجر، في ارتفاع ملحوظ في عدد الأشخاص الذين يأتون إلى العمل بغضّ النظر عن مدى سوء وضعهم الصحّي، ممّا يؤدّي من دون قصد إلى تفاقم الأمراض وانخفاض معدّلات الكفاءة عموماً.

تنتشر مشكلة الحضور الشكلي على نحو خاصّ في مجالَي الرعاية الصحّية والتعليم. ومن المفارقات أنّ الممرّضات والأطبّاء والمدرّسين يشعرون أنّهم ملزمون تجاه أعداد كبيرة من الأشخاص الذين يقومون على رعايتهم لدرجة أنّهم غالباً ما يعرّضونهم للخطر من خلال ذهابهم إلى العمل وهم يعانون من تأثيرات الطقس. مع ذلك، فإنّ صناعة الضيافة هي التي تشهد مشكلة الحضور الشكلي على نحو أكثر حدّة. فقد وجدت إحدى الدراسات أنّه في الولايات المتّحدة وحدها، تمّ ربط أكثر من 1000 حالة تفشٍّ لجرثومة التقيّؤ، نوروفيروس، بالأغذية الملوّثة في السنوات الأربع الممتدّة بين عامَي 2009 و2012 [132]. ومرض ما يزيد عن 21,000 شخص نتيجة لذلك، وكانت نسبة 70% من حالات التفشّي مرتبطة بموظّفي الخدمات الغذائية المرضى.

بعد مرور خمس سنوات على تلك الدراسة، أصبحت تشيبوتل مكسيكان غريل ضحيّة كبيرة للعواقب الضارّة للحضور الشكلي. فمن عام 2013 إلى 2015، تمّ تصنيف تشيبوتل كأقوى علامة تجارية لمطعم مكسيكي في الولايات المتّحدة. وعلى الرغم من وجود سياسة إجازة مرضية مدفوعة الأجر، فقد أفاد العديد من العمّال في فروع تشيبوتل في جميع أنحاء الولايات المتّحدة أنّ المدراء يطلبون منهم المجيء إلى العمل أثناء المرض، تحت طائلة فقدان وظائفهم.

في الرابع عشر من يوليو 2017، خرج بول كورنيل للاستمتاع بطبق بوريتو في فرع تشيبوتل في ستيرلنغ، بولاية فرجينيا. وفي ذلك المساء نفسه، أتى عامل في المطعم لم يكشف عن اسمه إلى العمل، على الرغم من أنّه كان يعاني من تقلّصات في المعدة وغثيان. بعد أربع وعشرين ساعة، تمّ نقل كورنيل إلى المستشفى. هناك، عُلّق له المصل وتبيّن أنّه كان يعاني من آلام شديدة في المعدة، وغثيان، وإسهال، وقيء، وهي أعراض تطابق أعراض نوروفيروس. كما أصيب 135 شخصاً آخرين من الموظّفين والزبائن بالفيروس بعد زيارة المطعم. في الأيّام الخمسة التالية بعد ذلك التفشّي للفيروس، انخفض سعر أسهم تشيبوتل، وخسرت الشركة أكثر من مليار دولار من قيمتها السوقية، الأمر الذي دفع بالمساهمين إلى رفع دعوى قضائية جماعية ضدّها. وبحلول نهاية عام 2017، لم يتمكّن المطعم من الوصول حتّى إلى نصف قائمة سلاسل المطاعم المكسيكية المفضّلة في أميركا.

يوضح نموذج S-I-R أهمّية عدم القدوم إلى العمل خلال المرض. فبالمكوث في المنزل حتّى الشفاء التامّ، تنقل نفسك بشكل فعّال من الفئة المصابة إلى الفئة المستبعدة مباشرة. ويوضح النموذج أنّ هذا الإجراء البسيط يمكن أن يقلّل من حجم تفشّي المرض عن طريق تقليص فرص انتقاله إلى الأفراد المعرّضين للعدوى. ليس هذا فحسب، بل يمنح المريض نفسه أيضاً فرصة أفضل للشفاء العاجل بعدم «العمل أثناء الشعور بالألم». ويصف نموذج S-I-R أنّه إذا اتّبع كلّ شخص

مصاب بمرض معدٍ هذه الممارسة، فإنّنا نستفيد من ذلك جميعاً من خلال الحدّ من إغلاقات المطاعم والمدارس والمستشفيات لأهداف وقائية.

* * *

ربّما كان الأهمّ من قدرة نموذج S-I-R الوصفية هي قدرته التوقّعية. فبدلاً من النظر إلى الأوبئة السابقة، سمح النموذج لكيرماك ومكيندريك بالتطلّع إلى الأمام، لتوقّع الديناميّات المتفجّرة لتفشّي الأمراض وفهم الأنماط الغامضة أحياناً لتطوّر المرض. في الواقع، استخدم العالمان نموذجهما لمعالجة بعض الأسئلة الأكثر إثارة للجدل في علم الأوبئة في ذلك الوقت. تركّز إحدى تلك النقاشات على السؤال التالي: «ما الذي يتسبّب في زوال الوباء؟». هل يكون المرض ببساطة قد أصاب جميع السكّان؟ فربّما بمجرّد استنفاد السكّان المعرّضين للإصابة، لا يجد المكان مجالاً للاستمرار. بدلاً من ذلك، ربّما يصبح العامل المسبّب للمرض أقل فاعليّة بمرور الوقت، إلى الحدّ الذي لا يعود معه قادراً على إصابة الأفراد الأصحّاء.

في ذلك البحث المؤثّر، تمكّن العالمان الاسكتلنديان من الإثبات أنّ أيّاً من هذه الاحتمالات لا ينطبق بالضرورة[133]. فعند النظر إلى حالة سكّان بلادهما عند تفشّي محاكاة للوباء، وجدا أنّه يبقى دائماً بعض الأفراد المعرّضين للإصابة. وهذا يتناقض مباشرة مع حدسنا (الذي تغذّيه الأفلام وقصص الرعب في وسائل الإعلام) والذي قد يدفعنا إلى الاعتقاد أنّ الوباء يزول لأنّه لم يعد ثمّة أشخاص ليصيبهم. في الواقع، عندما يشفى المرضى أو يموتون، يصبح الاتّصال بين بقيّة المصابين والأشخاص المعرّضين للعدوى نادراً جداً بحيث لا يتاح للمصابين فرصة لنقل المرض قبل أن يتمّ استبعادهم (إمّا بالشفاء مع اكتساب المناعة أو بالوفاة). ويتوقّع نموذج S-I-R أنّه في نهاية المطاف، تزول الأوبئة بسبب قلّة الأشخاص المصابين، وليس قلّة المعرّضين للإصابة[134].

في المجتمع الصغير للعاملين على نمذجة الأوبئة في عشرينيات القرن المنصرم، شكّل نموذج S-I-R الذي ابتكره كيرماك ومكيندريك مساهمة كبيرة. فقد رفع دراسة تطوّر الأمراض بشكل كبير فوق مستويات الدراسات الوصفية البحتة التي سبقته، وسمح بإلقاء نظرات خاطفة على المستقبل بعيد المدى. مع ذلك، فإنّ هذه النوافذ التي فتحها بقيت محدودة بالأسس الضيّقة التي بُني عليها النموذج: الافتراضات العديدة التي حدّت من المواقف التي كان يمكن أن يقدّم فيها توقّعات مجدية. يشمل ذلك: معدّل ثابت من انتقال الأمراض بين البشر؛ وكون المصابين يصبحون ناقلين

للعدوى فوراً؛ وكون أعداد السكّان لم تتغيّر. ومع أنّ هذه الافتراضات مفيدة لوصف بعض الأمراض أحياناً، إلّا أنّها لا تنطبق على الأغلبية.

على سبيل المثال، فإنّ بيانات طاعون بومباي التي استخدمها كيرماك ومكيندريك «للتحقّق من صحّة» نموذجهما تخالف كثيراً من هذه الافتراضات. أوّلاً، لم ينتقل طاعون بومباي في المقام الأوّل من إنسان إلى إنسان، بل انتشر بواسطة جرذان تحمل براغيث كانت بدورها تحمل بكتيريا الطاعون. افترض نموذجهما أيضاً وجود معدّل انتقال ثابت بين حاملي العدوى وضحاياهم المحتملين. في الواقع، (وكما هو الحال مع الانتشار الفيروسي لتحدّي دلو الثلج الذي ذكرناه في الفصل 1) كان ثمّة مكوّن موسمي قويّ لطاعون بومباي، إذ كانت كثافة البراغيث والوفرة البكتيرية في مستويات أعلى بكثير من يناير إلى مارس، ممّا أدّى إلى زيادة في معدّل انتقال العدوى.

مع ذلك، فإنّ الأجيال المستقبلية من علماء الرياضيّات ستكيّف نموذج S-I-R الأصلي، وتخفّف من افتراضاته التقييدية، وتوسّع نطاق الأمراض التي يمكن للرياضيّات أن تسبر أغوارها.

* * *

كان أحد أوّل التعديلات التي أجريت على نموذج S-I-R الأصلي هو تمثيل الأمراض التي لا تمنح حصانة لضحاياها. من هذه الحالات المرضية التي تعدّ نموذجيّة لبعض الأمراض التي تنتقل عن طريق الاتّصال الجنسي، داء السيلان الذي لا يتمّ معه استبعاد أشخاص على الإطلاق. فحالما يتعافى الشخص من مرض السيلان، يصبح قادراً على التقاط العدوى مجدّداً. وبما أنّ لا أحد يموت بسبب أعراض هذا المرض، فلا أحد «يُستبعد» من الإصابة. عادةً ما يتمّ تصنيف هذه النماذج باسم S-I-S، في محاكاة لنمط تقدّم الفرد من حالة التعرّض للعدوى إلى التقاطها والعودة إلى حالة العرضة للعدوى مجدّداً. وبما أنّ أعداد الأشخاص المعرّضين للالتقاط العدوى لا ينفد أبداً، بل يتجدّد مع شفاء المرضى، يتوقّع نموذج S-I-S أنّ الأمراض يمكن أن تصبح متكيّفة ذاتياً أو «مستوطنة»، حتّى ضمن مجتمع معزول من دون ولادات أو وفيات. ففي إنكلترا، ساهمت حالة استيطان مرض السيلان في تحويله إلى ثاني أكثر عدوى منقولة جنسياً، إذ تمّ الإبلاغ عن أكثر من 44,000 حالة في عام 2017.

في الواقع، يحتاج النموذج الأساسي إلى مزيد من التعديلات لتمثيل الأمراض المنقولة جنسياً بشكل صحيح مثل السيلان. ولا يُعتبر نمط تقدّمها سهلاً مثل أمراض أخرى، كنزلات البرد التي يمكن لأيّ شخص أن ينقلها إلى شخص آخر. فمع الأمراض المنقولة جنسياً، لا يمكن لحاملي

المرض أن ينقلوا العدوى سوى إلى الأشخاص المطابقين لميولهم الجنسية. وبما أنّ غالبية اللقاءات الجنسية تقع بين الجنسين، فإنّ النموذج الرياضي الأكثر وضوحاً يقسم السكّان إلى ذكور وإناث، ويسمح بانتقال العدوى بين هاتين المجموعتين فقط وليس بين الجميع. تُنتج النماذج التي تأخذ في الاعتبار الطبيعة ثنائية الأطراف للتفاعلات بين الجنسين إلى انتشار المرض بشكل أبطأ من النماذج التي يُفترض فيها أنّ بإمكان كلّ شخص نقل المرض إلى أيّ شخص آخر بغضّ النظر عن الجنس والميل الجنسي. غير أنّ هذه النماذج من الأمراض المنقولة جنسياً مليئة بالأفخاخ المحتملة.

فيروس الورم الحليمي البشري - أكثر من مجرّد فيروس سرطان

كانت ذكريات عيد ميلادي الخامس لا تزال حيّة عندما تمّ تشخيص إصابة والدتي بسرطان عنق الرحم في سنّ الأربعين. تحمّلَت جولة تلو الأخرى من العلاج الكيميائي والإشعاعي الشاقّ والموهن. ولحسن الحظّ، في نهاية تلك العمليّة الصعبة، قيل لها إنّها شُفيت تماماً. وفوجئتُ عندما عرفت لاحقاً أنّ سرطان عنق الرحم هو من السرطانات القليلة التي تنتج أساساً عن فيروس - أي سرطان يمكن للمرأة أن تلتقطه، وذلك عن طريق الاتّصال الجنسي عادة. من الصعب عليّ التفكير أنّ والدي كان يحمل الفيروس الذي تسبّب في إصابة أمّي بالسرطان. فقد اهتمّ بها كثيراً عندما عاودها المرض. وكانت قوّة إرادته هي التي أبقت عائلتنا متماسكة عندما توفّيت قبل عدّة أسابيع من عيد ميلادها الخامس والأربعين. لكن حتّى لو لم يكن يعرف، فكيف نقل إليها الفيروس؟

اتّضح أنّ الغالبية العظمى من حالات الإصابة بفيروس الورم الحليمي البشري التي تسبّب سرطان عنق الرحم تنتقل عن طريق الاتّصال الجنسي. فما يزيد عن 60% من جميع أنواع سرطان عنق الرحم سببها سلالتان من فيروس الورم الحليمي البشري[135]. في الواقع، يُعتبر هذا الفيروس أكثر الأمراض التي تنتقل عن طريق الاتّصال الجنسي في العالم[136]. إذ يمكن للرجال حمل الفيروس من دون أن تظهر عليهم أيّ أعراض، وتمريره إلى شريكاتهنّ في الجنس، ممّا يسهم في الإصابة بسرطان عنق الرحم باعتباره الرابع بين أكثر أنواع السرطان شيوعاً بين النساء. إذ يتمّ الإبلاغ عن نحو نصف مليون حالة جديدة وربع مليون حالة وفاة حول العالم سنويّاً.

في عام 2006، تمّت الموافقة على أوّل اللقاحات الثورية ضدّ فيروس الورم الحليمي البشري من قبل إدارة الغذاء والدواء الأميركية. ولا عجب أنّه نظراً إلى ارتفاع معدّلات الإصابة،

كان ثمّة أمل كبير بشأن الترخيص لاستعمال اللقاح. فقد أشارت الدراسات التي أجريت في المملكة المتّحدة في وقت قريب من نشر اللقاح إلى أنّ الاستراتيجية الأكثر فاعليّة من حيث التكلفة هي تحصين المراهقات اللواتي تتراوح أعمارهنّ بين 12 و13 عاماً، واللواتي يحتمل أن يصبن بسرطان عنق الرحم في المستقبل[137]. وأكّدت دراسات ذات صلة في بلدان أخرى أنّه بالنظر إلى النماذج الرياضية لانتقال المرض بين الجنسين، فإنّ تلقيح الإناث فقط هو أفضل مسار للعمل[138].

مع ذلك، أظهرت هذه الدراسات الأوّلية في نهاية المطاف أنّ أيّ نموذج رياضي يُعدّ جيّداً فقط بقدر الافتراضات التي يقوم عليها والبيانات التي تشكّل إطاراً له. وقد أهملت معظم هذه التحليلات تضمين سمة مهمّة من فيروس الورم الحليمي البشري في افتراضات النمذجة: أنّ سلالات الفيروس التي يحمي منها اللقاح يمكن أن تسبّب أيضاً مجموعة من الأمراض غير المرتبطة بعنق الرحم لدى كلّ من النساء والرجال[139].

فإذا أصيب المرء في حياته بالثؤلل، يكون قد آوى على الأقلّ واحداً من خمسة أنواع من فيروس الورم الحليمي البشري. وتشير التقديرات إلى أنّ 80% من الأشخاص في المملكة المتّحدة سيصابون بسلالة واحدة من هذا الفيروس في مرحلة ما من حياتهم. بالإضافة إلى التسبّب بسرطان عنق الرحم، تسهم أنواع فيروس الورم الحليمي البشري 16 و18 في 50% من حالات سرطان القضيب، و80% من سرطانات الشرج، و20%من سرطانات الفم، و30% من سرطانات الحلق[140]. ففي كلّ من الولايات المتّحدة والمملكة المتّحدة، فإنّ معظم أنواع السرطانات الناجمة عن فيروس الورم الحليمي البشري لا تصيب عنق الرحم[141]. والملحوظ أنّ النوعين 6 و11 من الفيروس يسبّبان أيضاً تسعاً من أصل كلّ عشر حالات من الثآليل التناسلية[142]. ففي الولايات المتّحدة، يتمّ إنفاق نحو 60% من تكاليف الرعاية الصحّية المرتبطة بجميع الإصابات بفيروس الورم الحليمي البشري غير المرتبط بعنق الرحم على علاج هذه الثآليل[143]. ويُعتبر سرطان عنق الرحم جزءاً مهمّاً من الدراسات المكتوبة عن فيروس الورم الحليمي البشري، لكنّه لا يمثّل القصّة كلّها.

في عام 2008، عندما تمّ طرح اللقاح للمرّة الأولى، حصل عالم الفيروسات الألماني هارالد تسور هاوزن على جائزة نوبل في الطبّ «لاكتشافه فيروسات الورم الحليمي البشري التي تسبّب سرطان عنق الرحم». وتمّ تجاهل العلاقة بأنواع أخرى من السرطان والأمراض من قبل لجنة الجائزة ومعظم بقيّة العالم. لم تكن الدراسة البريطانية التي تناولت السرطانات غير المرتبطة بعنق الرحم قادرة على القيام بذلك بشكل يقيني، لأنّه في ذلك الوقت، لم يكن عبء الأمراض وتأثير اللقاح

ضدّها مفهومَين بشكل صحيح[144]. اقترحت معظم النماذج أنّه بتطعيم نسبة عالية بشكل كافٍ من الإناث، فإنّ معدّل انتشار الأمراض المرتبطة بفيروس الورم الحليمي البشري لدى الذكور غير المحميين سينخفض أيضاً. قبل عامّة الناس من دون تشكيك بقرار تلقيح الفتيات فقط، ربّما لأنّهم لا يدركون سوى دور فيروس الورم الحليمي البشري في التسبّب بسرطان عنق الرحم - وهو السرطان الشائع الذي ينتشر مثل المرض المعدي. فلماذا يجب تحصين الذكور إذا كانوا لا يعانون من سرطان فيروس الورم الحليمي البشري؟

لكن تخيّلوا غضب الجمهور إذا تمّ تطوير لقاح ضدّ فيروس نقص المناعة البشرية الذي يسبّب الإيدز، واتُّخذ قرار بتلقيح النساء فقط مجّاناً، على أن يحصل الرجال على الحماية من خلال مناعة النساء. بصرف النظر عن القضايا المرتبطة بالتحصين الجزئي وعدم كفاءة اللقاح، فربّما تكون النقطة الأولى التي سيتناولها النقّاد تتعلّق بحماية الرجال المثليين. هل يُتركون بلا دفاع ضدّ الفيروس القاتل؟ تنطبق الحجّة نفسها في حالة فيروس الورم الحليمي البشري. فمن خلال إهمال العلاقات الجنسية المثلية في النماذج الرياضية، تجاهلت الدراسات المبكرة آثار العلاقات المثلية. في الواقع، تملك النماذج القائمة على الشبكات الجنسية التي تتضمّن العلاقات المثلية معدّلاً أعلى لانتقال المرض من تلك التي تقتصر على العلاقات بين الجنسين[145]. ويُعتبر انتشار فيروس الورم الحليمي البشري لدى الرجال المثليين أعلى بكثير ممّا هو عليه بين عموم السكان[146]. في الولايات المتّحدة، يرتفع معدّل الإصابة بسرطان الشرج لدى هذه المجموعة أكثر من 15 مرّة. وبنسبة 35 لكلّ 100,000، يُعتبر مشابهاً لمعدّلات سرطان عنق الرحم لدى النساء قبل بدء فحص عنق الرحم، وأعلى بكثير من المعدّلات الحالية لسرطان عنق الرحم في الولايات المتّحدة[147]. وعندما تمّت إعادة معايرة النماذج، مع أخذ العلاقات الجنسية المثلية في الاعتبار، واكتساب معرفة جديدة حول الحماية من السرطانات غير المرتبطة بعنق الرحم، وامتلاك معلومات محدّثة عن طول الحماية التي توفّرها اللقاحات، تبيّن أنّ تلقيح الذكور والإناث سيكون خياراً فاعلاً من حيث التكلفة.

في أبريل 2018، قدّمت خدمة الصحّة الوطنية بالمملكة المتّحدة في نهاية المطاف لقاحاً ضدّ فيروس الورم الحليمي البشري للرجال المثليين الذين تتراوح أعمارهم بين 15 و45 عاماً. وفي يوليو من العام نفسه، تمّت التوصية بناءً على دراسة جديدة لفاعليّة التكلفة بتلقيح جميع الذكور في المملكة المتّحدة ضدّ فيروس الورم الحليمي البشري في العمر نفسه الذي يعطى فيه اللقاح للفتيات[148]. ولحسن الحظّ، سيحظى كلّ من ابني وابنتي بحماية متساوية ضدّ الإصابة بهذا الفيروس

الذي قتل جدّتهما. وهذا يُثبت أنّ الاستنتاجات المستخلصة من النماذج الرياضية الأكثر تطوّراً تُعتبر قويّة بقدر ما تُعدّ افتراضاتها ضعيفة.

الوباء التالي

من العوامل الأخرى المربكة التي ترافق عدوى فيروس الورم الحليمي البشري، حمل المرض من دون أعراض. إذ يمكن للناس إيواء الفيروس، ونقله للآخرين من دون أن يعانوا من أيّ أعراض هم أنفسهم. لهذا السبب، ثمّة تكييف آخر يتمّ إجراؤه عادةً على نموذج S-I-R الأساسي، من أجل تمثيل الأمراض بشكل أكثر واقعية، ويقوم على تضمين فئة من الناس الذين يستطيعون، بمجرّد الإصابة، نقل المرض من دون معاناة أيّ أعراض. وتغيّر الفئة المسمّاة «الناقل» نموذج S-I-R إلى نموذج S-C-I-R، وهو نموذج حيوي لتمثيل انتقال العديد من الأمراض، بما في ذلك بعض من أكثرها فتكاً في عصرنا.

يعاني بعض المرضى من أعراض شبيهة بالأنفلونزا لفترة قصيرة بعد أسابيع قليلة من التقاط فيروس نقص المناعة البشرية. وتختلف شدّة الأعراض على نطاق واسع، حتّى إنّ بعض حاملي المرض لا يلاحظون حتّى أنّهم يعانون من أيّ خطب. لكن على الرغم من عدم ظهور أعراض واضحة، إلّا أنّ الفيروس يدمّر الجهاز المناعي للمريض ببطء، ممّا يجعله مفتوحاً على الإصابة بأنواع من العدوى الانتهازية مثل السلّ أو السرطانات التي قد لا يلتقطها ذوي الأجهزة المناعيّة السليمة. وفي المراحل اللاحقة من الإصابة بفيروس نقص المناعة البشرية، يقال إنّ المرضى أصيبوا بمتلازمة نقص المناعة المكتسبة. وأحد الأسباب الرئيسة وراء تحوّل فيروس نقص المناعة البشرية/الإيدز إلى وباء، أي انتشاره في جميع أنحاء العالم واستمرار هذا الانتشار حتّى اليوم، هي فترة الحضانة الطويلة تلك. إذ أنّ حاملي الفيروس الذين لا يدركون ذلك ينشرون المرض بسرعة أكبر من الأشخاص الذين يعرفون أنّهم مصابون بفيروس نقص المناعة البشرية. وكلّ عام، على مدار الثلاثين عاماً الماضية وأكثر، كان فيروس نقص المناعة البشرية أحد أهمّ أسباب الوفاة الناتجة عن الأمراض المعدية في العالم.

في الواقع، يُعتقد أنّ فيروس نقص المناعة البشرية ظهر من الرئيسيات غير البشرية في وسط أفريقيا في أوائل القرن العشرين. وربّما نتيجة للاتّصال بين البشر والقردة المصابة التي تمّ صيدها من أجل لحومها في الأدغال، انتقل شكل متحوّر من فيروس نقص المناعة القردي (SIV)

إلى البشر، وتمكّن من الانتشار بين الناس عبر تبادل السوائل الجسدية. وتمثّل الأمراض حيوانية المنشأ، مثل السلالات الأصلية لفيروس نقص المناعة البشرية التي تتنقّل بين الأنواع، أحد أكبر التهديدات المحتملة للصحّة العامّة.

في عام 2018، حدّد نائب كبير الأطبّاء في إنكلترا، البروفيسور جوناثان فان-تام، أحد هذه الأمراض، وهو فيروس H7N9 - الذي يُعتبر سلالة جديدة من أنفلونزا الطيور - على أنّه السبب الأكثر احتمالاً لوباء الإنفلونزا العالمي القادم. ينتشر الفيروس حاليّاً بشكل كبير بين الطيور الصينية، وقد أصاب أكثر من 1500 شخص. لوضع هذا الكلام في المنظور الصحيح، فقد أصابت الإنفلونزا الإسبانية، أكثر الأوبئة فتكاً في القرن العشرين، نحو 500 مليون شخص في جميع أنحاء العالم. مع ذلك، فإنّ معدّل الوفيات نتيجة الإنفلونزا الإسبانية كان نحو 10% فقط. بالمقابل، يقتل فيروس H7N9 نحو 40% من المصابين به. لكن لحسن الحظّ، لم يكتسب هذا الفيروس حتّى الآن القدرة الحاسمة على الانتقال بين البشر، وهو الشرط اللازم لكي ينتشر بمستوى الإنفلونزا الإسبانية. وعلى الرغم من أنّ التجارب على الحيوانات تشير إلى أنّه ما زال يحتاج إلى ثلاث طفرات فقط ليتمكّن من ذلك، إلّا أنّ هذا الأمر قد لا يحدث مطلقاً، تماماً على غرار السلالة السابقة من أنفلونزا الطيور H5N1. ومن المحتمل تماماً ألّا يكون الوباء العالمي القادم هو مرض ناشئ إطلاقاً، بل مرض رأيناه عدّة مرّات من قبل.

المريض صفر

بعد ظهر أحد الأيّام في أواخر عام 2013، كان إيميل أومونو البالغ من العمر عامين يلعب مع بعض الأطفال الآخرين في قرية ميلاندو الغينية النائية. وكان المخبأ المفضّل لدى الأولاد شجرة كولا ضخمة مجوّفة تقع على مشارف القرية. شكّل تجويف الشجرة العميق والمظلم مأوىً مثالياً أيضاً لمجموعة من الخفافيش حرّة الذيل التي تقتات على الحشرات. وأثناء اللعب في الشجرة المليئة بالخفافيش، تعرّض إيميل لذرق حديث للخفافيش، أو ربّما وجد نفسه وجهاً لوجه مع أحد الخفافيش نفسها.

في الثاني من ديسمبر، لاحظت والدة إيميل أنّ طفلها الصغير النشيط عادة كان متعباً وبليداً. وبعدما شعرت بحرارة الحمّى المنبعثة من جبهته، نقلته إلى الفراش ليرتاح. ولكن، سرعان ما بدأ يعاني من التقيّؤ والإسهال الأسود، ثمّ توفّي بعد أربعة أيّام.

أصيبت والدة إيميل بالمرض، بعدما اعتنت بابنها بتفانٍ، وتوفّيت بعد أسبوع. تلتها شقيقة إيميل، فيلومين، ومن ثمّ جدّتهما في اليوم الأوّل من العام الجديد. نقلت قابلة القرية التي اهتمّت بالأسرة أثناء مرضها، المرض معها عن غير قصد إلى القرى المجاورة، ومن ثمّ إلى المستشفى في مدينة غيكيدو الأقرب، حيث تلقّت العلاج. من هناك، كانت إحدى القنوات العديدة للانتشار المستمرّ للمرض عينه عاملة صحّية عالجت القابلة. فنقلت الفيروس إلى مستشفى ماكينتا، الذي يبعد نحو 50 ميلاً إلى الشرق. وهناك، انتقلت العدوى إلى الطبيب الذي عالجها، والذي نقلها بدوره إلى شقيقه في مدينة كيسيدوغو، على بعد 80 ميلاً إلى الشمال الغربي، وهكذا استمرّ انتشار المرض.

في 18 مارس، أصبح عدد الحالات وامتدادها مصدر قلق كبير. فأعلن مسؤولو الصحّة عن تفشّي حمّى نزفية، لم يتمّ تحديدها بعد، «تنتشر كالبرق». وبعد أسبوعين، عندما تمّ التعرّف على المرض، وصفت منظّمة أطبّاء بلا حدود مقياس انتشاره أنّه «غير مسبوق». من هذه النقطة فصاعداً، تحوّل إيميل أومونو، وهو طفل لم يكن معروفاً، إلى شخص لن ينساه العالم أبداً. وسيُعرف بشكل مأساوي باسم «المريض صفر»: ضحيّة أوّل انتقال من الحيوان إلى البشر لما سيصبح أكبر انتشار على الإطلاق لفيروس الإيبولا في العالم.

إنّ مجرّد إدراكنا لتقدّم المرض هو تقدير للتفصيل الهائل الذي تمّ به تحليل الوباء على أيدي العلماء وأخصّائيي الرعاية الصحّية، الذين وضعوا أنفسهم في طريقه مباشرة. ثمّة طريقة تُعرف باسم «تتبّع الاتّصال» تتيح لخبراء الوباء العمل عكسياً عبر أجيال عديدة من الأفراد المصابين، وصولاً إلى الحالة الأصلية - أي المريض صفر - وهو لقب إيميل. فمن خلال الطلب من الأفراد المصابين إدراج جميع الأشخاص الذين اتّصلوا بهم أثناء وبعد فترة حضانة المرض - عندما كانوا مصابين ولكن لم تظهر أعراضهم بالضرورة - يستطيع العلماء بناء صورة لشبكة الاتّصال الخاصّة بهم. ومن خلال تكرار العمليّة عدّة مرّات على الأفراد الذين تشملهم الشبكة، يمكن في كثير من الأحيان التوصّل إلى مصدر واحد للمرض. وبالإضافة إلى السماح لنا بالتعرّف على النمط المعقّد لانتشار الأمراض من أجل اقتراح طرق لمنع تفشّيها في المستقبل، يتيح لنا تتبّع الاتّصال أيضاً اتّخاذ تدابير في الوقت الفعلي للسيطرة على انتشار المرض. كما من شأنه أن يزوّدنا بمعلومات عن استراتيجيات فاعلة لاحتواء المرض في مراحله المبكرة. فيتمّ إخضاع كلّ شخص كان على اتّصال مباشر مع مصاب ضمن الإطار الزمني للحضانة إلى الحجر الصحي، حتّى يثبت خلوّه من المرض أو إصابته به. وفي حالة التقاط العدوى، يمكن إبقاء الشخص في عزلة لتجنّب احتمال نقله العدوى إلى الآخرين.

* * *

غير أنّه في الممارسة العمليّة، غالباً ما تكون شبكات الاتّصال غير مكتملة، ويكون كثير من حاملي المرض غير معروفين لدى السلطات. في الواقع، ثمّة كثير من الأفراد الذين لا يعرفون حتّى أنّهم يحملون المرض بسبب فترة الحضانة التي تسبق ظهور الأعراض. ومع الإيبولا، يمكن أن تمتدّ فترة الحضانة إلى 21 يوماً، لكنّها تبلغ في المتوسّط نحو 12 يوماً. في أكتوبر 2014، أصبح من الواضح أنّ الوباء المنتشر في غرب أفريقيا قد يتّخذ أبعاداً عالمية. فأعلنت حكومة المملكة المتّحدة، بهدف حماية مواطنيها مبدئيّاً، أنّه سيتمّ إجراء فحص محسّن لفيروس إيبولا للمسافرين الذين يدخلون المملكة المتّحدة من البلدان عالية الخطورة في خمسة مطارات بريطانية وفي محطّة يوروستار في لندن.

في برنامج مماثل في كندا، خلال تفشّي وباء السارس (المتلازمة التنفّسية الحادّة الوخيمة) في عام 2004، تمّ فحص ما يقرب من نصف مليون مسافر، ولم يُكتشف لدى أيّ منهم ارتفاع في الحرارة يدلّ على المرض. كلّف البرنامج الحكومة الكندية 15 مليون دولار. في مرحلة لاحقة، تبيّن أنّ برنامج فحص السارس كان إجراءً غير مجدٍ، وربّما طمأن الشعب الكندي أنّه آمن، لكنّه لم يكن فعّالاً كاستراتيجيّة تدخّل.

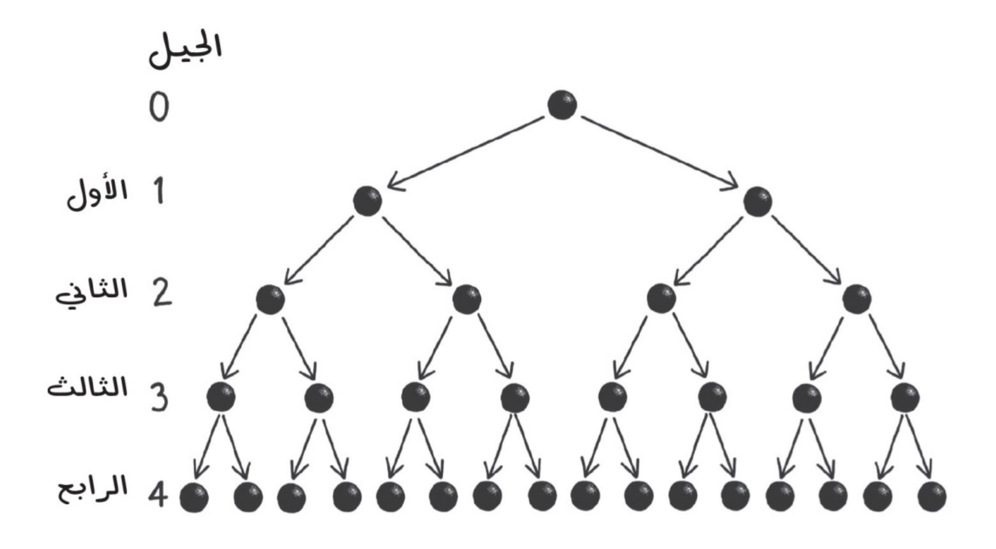
مع وضع هذه النفقات في الاعتبار، بالإضافة إلى ردّ الفعل المشحون الذي أثير بلا داع، قام فريق من علماء الرياضيات من كلّية لندن للصحّة والطبّ الاستوائي بتطوير نموذج رياضي بسيط يشتمل على فترة حضانة[149]. وبالنظر إلى متوسّط فترة الحضانة لمدّة 12 يوماً لمرض الإيبولا ووقت الطيران لمدّة ستّ ساعات ونصف من فريتاون في سيراليون إلى لندن، قام علماء الرياضيّات بحساب أنّ نحو 7% فقط من المسافرين الحاملين للفيروس على متن الطائرات سيتمّ اكتشافهم من خلال التدابير الجديدة باهظة الثمن. واقترحوا أنّه من الأفضل إنفاق الأموال على الأزمة الإنسانية المتنامية في غرب أفريقيا، الأمر الذي سيعالج مصدر المشكلة، ويخفّف بالتالي من خطر انتقال المرض إلى المملكة المتّحدة. وهذا مثال على التدخّل الرياضي في أفضل حالاته - بسيط وحاسم وقائم على أدلّة. فبدلاً من التكهّن بمدى فاعليّة إجراءات الفحص، يمكن للتمثيل الرياضي البسيط للموقف أن يقدّم رؤى قوية ويساعد في توجيه السياسة.

عدد التكاثر الأساسي والانفجار الأسّي

لم يكن مسار انتشار العدوى الذي استخدم لتحديد إيميل أومونو على أنّه المريض صفر لوباء الإيبولا فريداً من نوعه. فقد انتشر المرض من مركزه في ميلاندو عبر مسارات متعدّدة واضحة. ففي المراحل المبكرة، تكاثر المرض على نحو أسّي من خلال قنوات مستقلّة متعدّدة، على غرار الميمات أو حملات التسويق الفيروسية التي ذكرناها في الفصل 1. إذ نقل شخص واحد العدوى إلى ثلاثة آخرين، ونقلها هؤلاء بدورهم إلى أشخاص آخرين، ومنهم إلى مزيد من الناس، وهكذا تفشّى الوباء على نحو أسّي تقريباً. ويمكن تحديد ما إذا كان الوباء سيتفشّى أو يخمد بشكل غامض برقم واحد فريد يختصّ بذاك الوباء ويسمّى عدد التكاثر الأساسي.

فلنأخذ مثالاً مجموعة من السكّان المعرّضين تماماً لمرض معيّن، مثل السكّان الأصليين لأميركا الوسطى في القرن السادس عشر قبل وصول الغزاة. يُعرف متوسّط عدد الأفراد الذين لم يتعرّضوا من قبل للعدوى من قِبل حامل واحد لمرض أُدخل حديثاً باسم «عدد التكاثر الأساسي» وغالباً ما يشار إليه بالرمز R0. إذا كان عدد التكاثر الأساسي للمرض أقلّ من 1، فإنّ العدوى ستخمد بسرعة لأنّ كلّ شخص معدٍ سينقل المرض، في المتوسّط، إلى أقلّ من شخص واحد آخر. ولا يمكن للوباء بهذه الحالة أن يستمرّ بالانتشار. أمّا إذا كان عدد التكاثر الأساسي أكبر من واحد، فعندئذ سينتشر الوباء بشكل أسّي.

مثال على ذلك مرض السارس، الذي يمتاز بعدد تكاثر أساسي يبلغ 2. أوّل مصاب بالمرض هو المريض صفر. ينقل هذا المريض الوباء إلى اثنين آخرَين، وكلّ منهما سينقل المرض إلى اثنين آخرَين، وهكذا دواليك. وكما رأينا في الفصل الأول، يوضح الشكل 23 النموّ الأسّي الذي يميّز المرحلة الأوّلية للعدوى. إذا استمرّ الوباء بالانتشار على هذا النحو، فسيصاب به أكثر من 1000 شخص بعد عشرة أجيال على سلسلة تقدّم المرض. وبعد عشر خطوات أخرى، سيرتفع عدد الضحايا إلى أكثر من مليون.



الشكل 23: الانتشار الأسّي لمرض ذي عدد تكاثر أساسي يبلغ 2. يُفترض أن يكون المصاب الأوّل في الجيل صفر. ومع تقدّمنا إلى الجيل الرابع، يصبح لدينا 16 شخصاً جديداً مصابين بالعدوى.

في الممارسة العمليّة، كما هو الحال مع انتشار فكرة فيروسية، أو وضع مخطّط هرمي، أو نموّ مستعمرة بكتيرية، أو تكاثر للسكّان، فإنّ النموّ الأسّي الذي يتوقّعه عدد التكاثر الأساسي نادراً ما يستمرّ إلى ما بعد بضع انتقالات للعدوى. إذ يبلغ الوباء في نهاية المطاف ذروته، ثمّ يبدأ بالانخفاض بسبب التواتر المتراجع لعمليّات الاتّصال بأشخاص معرّضين للعدوى. في النهاية، وحتّى في حال عدم وجود حالات معدية متبقّية وانتهاء الوباء رسميّاً، سيتبّقى ثمّة أشخاص معرّضين للمرض[150]. ففي عشرينيات القرن المنصرم، توصّل كيرماك ومكيندريك إلى صيغة استخدمت عدد التكاثر الأساسي لتوقّع عدد الأفراد المعرّضين للإصابة الذين سيبقون سليمين عند انتهاء الوباء. وبتقدير عدد التكاثر الأساسي نحو 1.5، تتوقّع صيغة كيرماك ومكيندريك أنّ وباء الإيبولا الذي تفشّى بين عامَي 2013 و2016 كان من الممكن أن يصيب 58% من السكّان لو لم يحدث أيّ تدخّل. بالمقابل، تبيّن أنّ لتفشّي شلل الأطفال عدد تكاثر أساسي نحو 6، ما يعني، بحسب توقّعات كيرماك ومكيندريك، أنّ الربع فقط من نسبة واحد بالمائة سوف ينجو ويبقى سالماً من دون تدخّل.

يُعتبر عدد التكاثر الأساسي أداة مفيدة دائماً لوصف تفشّي المرض لأنّه يضمّ كلّ التفاصيل الدقيقة لانتقال المرض إلى رقم واحد. فمن الطريقة التي تتطوّر بها العدوى في الجسم، إلى طريقة انتقال العدوى، وحتّى بنية المجتمعات التي تنتشر من خلالها، فإنّه يلتقط جميع السمات الرئيسة للوباء ويسمح لنا بالتحرّك على أساس ذلك. يمكن عادةً تقسيم عدد التكاثر الأساسي إلى ثلاثة مكوّنات: حجم السكّان؛ ومعدّل إصابة الأشخاص المعرّضين بالعدوى (المعروف غالباً باسم قوّة

العدوى)؛ ومعدّل الشفاء أو الوفاة نتيجة المرض. ويؤدّي ارتفاع اثنين من هذه العوامل إلى ارتفاع عدد التكاثر الأساسي، في حين أنّ ازدياد معدّل الشفاء يخفضه. فكلّما ارتفع عدد السكّان وازدادت سرعة انتشار المرض بين الأفراد، ازداد احتمال انتشار الوباء. وكلّما تعافى المصابون بشكل أسرع، انخفض الوقت الذي يملكونه لنقل المرض إلى الآخرين، وتراجع بالتالي احتمال تفشّي المرض. بالنسبة إلى عديد من الأمراض التي تصيب الإنسان، يمكننا السيطرة على أوّل عاملَين فقط. فعلى الرغم من أنّ المضادّات الحيوية أو الفيروسية من شأنها أن تقصّر مجرى بعض الأمراض، إلّا أنّ معدّل الشفاء أو الوفاة غالباً ما يشكّل خاصّية متأصّلة في مسبّبات الأمراض نفسها. تعدّ الكمّية المرتبطة ارتباطاً وثيقاً بـ R0 عددَ التكاثر الفعلي (الذي يُشار إليه غالباً بالرمز Re) - وهو متوسّط عدد الإصابات الثانوية التي يسبّبها شخصٌ معدٍ في مرحلة معيّنة من تطوّر الوباء. وإذا أمكن، عن طريق التدخّل، خفض Re إلى أقلّ من واحد، فسوف يُقضى على المرض.

على الرغم من الأهمّية البالغة للسيطرة على الأمراض، إلّا أنّ عدد التكاثر الأساسي لا يخبرنا بمدى خطورة المرض بالنسبة إلى شخص مصاب. على سبيل المثال، يُعتبر مرض شديد العدوى مثل الحصبة، والذي يتراوح فيه عدد التكاثر الأساسي بين 12 و18، أقلّ خطورة على المصاب من أمراض أخرى مثل الإيبولا، الذي يبلغ فيه عدد التكاثر الأساسي 1.5. ففي حين أنّ الحصبة تنتشر بسرعة، إلّا أنّ معدّل الوفيات فيها يُعتبر متدنّياً مقارنة بنسبة 50-70% بين مرضى الإيبولا الذين سيلقون حتفهم نتيجة المرض.

قد يكون من المستغرب أنّ الأمراض التي ترتفع فيها معدّلات الوفيات تميل لأن تكون أقلّ عدوى. فإذا كان المرض يقتل الكثير من ضحاياه بسرعة كبيرة، فإنّه يقلّل من فرص انتشاره. لهذا السبب، تعتبر الأمراض التي تقتل معظم المصابين بها وتنتشر بكفاءة نادرةً جدّاً، وغالباً ما تقتصر على أفلام الكوارث. وعلى الرغم من أنّ معدّل الوفيات المرتفع يضاعف بشكل كبير من الخوف المرتبط بانتشار المرض، إلّا أنّ الأمراض ذات عدد التكاثر الأساسي المرتفع ومعدّل الوفيات المنخفض قد تودي بحياة عدد أكبر من الأشخاص بسبب الأعداد الكبيرة التي تلتقط العدوى.

استناداً إلى الرياضيات، بمجرّد أن نقرّر ضرورة السيطرة على المرض، فإنّ معدّلات الوفيات لا توفّر معلومات مفيدة حول كيفيّة الحدّ من انتشار المرض. مع ذلك، تشير العوامل الثلاثة التي تشكّل عدد التكاثر الأساسي، إلى تدخّلات مهمّة من شأنها أن توقف الأمراض الفتّاكة قبل أن تواصل انتشارها من دون عائق.

السيطرة على الوباء

يعتبر التلقيح أحد أكثر الخيارات فاعليّة للحدّ من انتشار المرض. فعن طريق نقل الناس مباشرة من فئة المعرّضين للإصابة إلى فئة المستبعدين، وتجاوز الحالة المعدية، فإنّه يقلّص بشكل فاعل من حجم السكّان المعرّضين للإصابة. غير أنّ التلقيح يُعتبر عادة إجراءً احترازياً يطبَّق في محاولة للحدّ من احتمال تفشّي المرض. لكن عندما يتفشّى الوباء على نطاق واسع، غالباً ما يصبح من غير العملي تطوير واختبار لقاح فاعل في إطار زمني مجدٍ.

ثمّة استراتيجيّة بديلة تُستخدم للأمراض الحيوانية، وتملك التأثير الخافض نفسه على Re، أي عدد التكاثر الفعلي، ألا وهي الإعدام. ففي عام 2001، عندما تفشّت الحمّى القلاعية في بريطانيا، اتُّخذ القرار بإعدام الحيوانات المصابة. وعن طريق ذبح تلك الحيوانات، انخفضت الفترة المعدية من ثلاثة أسابيع إلى أيّام، ممّا قلّص بشكل كبير من عدد التكاثر الفعلي. لكن مع هذا الوباء، لم يكن إعدام الحيوانات المصابة فقط كافياً للسيطرة على المرض. إذ أفلتت بعض الحيوانات المعدية من هذا التدبير، وتسبّبت بنقل العدوى إلى حيوانات أخرى في الجوار. استجابة لذلك، نفّذت الحكومة استراتيجيّة إعدام الحيوانات ضمن حلقة معيّنة، وذلك عن طريق ذبح الحيوانات سواء كانت مصابة أم لا ضمن شعاع ثلاثة كيلومترات من المزارع المتضرّرة. للوهلة الأولى، يبدو إعدام الحيوانات غير المصابة تدبيراً لا طائل منه. لكن بما أنّه يقلّل من عدد الحيوانات المعرّضة للإصابة في منطقة محلّية - وهذا أحد العوامل التي تسهم في رفع عدد التكاثر - فإنّ هذا الإجراء يبطئ انتشار المرض بحسب الرياضيات.

بالنسبة إلى تفشّي الأمراض البشرية بين مجموعة من السكّان غير المحصّنين، فإنّ الإعدام ليس بالطبع خياراً مطروحاً. مع ذلك، يمكن للحجر الصحّي والعزل أن يثبتا فاعليّتهما المتناهية في خفض معدّل انتقال المرض، وبالتالي، انخفاض عدد التكاثر الفعلي. فعزل الأشخاص المصابين بالمرض يقلّل من وتيرة انتشاره، في حين أنّ الحجر الصحّي على الأشخاص الأصحّاء يقلّص من عدد السكّان المعرّضين فعليّاً لالتقاط المرض. ويساهم كلا الإجراءين في خفض عدد التكاثر الفعلي. هكذا، تمّت السيطرة بسرعة على آخر تفشٍّ لمرض الجدري في أوروبا، وذلك في يوغوسلافيا عام 1972، من خلال تدابير الحجر الصحّي القاسية. فقد احتُجز ما يصل إلى 000,10 شخص يُحتمل أن يكونوا حاملين للعدوى تحت حراسة مسلّحة في فنادق استُعملت لهذا الغرض الصريح، إلى حين زوال خطر ظهور حالات جديدة.

في حالات أقلّ تطرّفاً، يمكن للتطبيقات البسيطة للنمذجة الرياضيّة أن تقترح المدّة الأكثر فاعليّة لعزل المرضى المصابين[151]. كما يمكنه أيضاً تحديد ما إذا كان ينبغي أم لا فرض الحجر الصحّي على نسبة من السكّان غير المصابين، ومقارنة التكاليف الاقتصادية للحجر الصحّي على الأفراد الأصحّاء مقابل خطر تفشّي المرض على نطاق واسع. يأتي هذا النوع من النمذجة الرياضية في الواقع من تلقاء نفسه في الحالات التي يكون فيها إجراء دراسات ميدانية على تطوّر المرض غير عملي لأسباب إمّا لوجستية أو أخلاقية. على سبيل المثال، من غير الإنساني خلال تفشّي مرض معيّن حرمان جزء من السكّان لأغراض الدراسة من تدخّل من شأنه أن يُنقذ الأرواح. بالمثل، من غير العملي في عالم الواقع فرض الحجر الصحّي على نسبة كبيرة من السكّان لفترة طويلة من الزمن. لكنّ هذه الهموم غير واردة عند تشغيل نظام رياضي. فبإمكاننا اختبار النماذج التي تعزل الجميع، أو لا تعزل أحداً، أو تعزل جزءاً من السكّان، في محاولة لموازنة التأثير الاقتصادي لهذا العزل القسري مع تأثيره على تطوّر المرض.

هذا هو الجمال الحقيقي لعلم الأوبئة الرياضي - القدرة على اختبار السيناريوهات التي لا يمكن تنفيذها في عالم الواقع، والخروج في بعض الأحيان بنتائج مفاجئة وغير بديهية. على سبيل المثال، أظهرت الرياضيّات أنّه بالنسبة إلى أمراض مثل الجدري، قد تكون العزلة والحجر الصحّي استراتيجيّة خاطئة[152]. فمحاولة الفصل بين الأطفال الذين يعانون من المرض والأطفال السليمين ستؤدّي بلا شكّ إلى خسارة العديد من أيّام الدراسة والعمل، من أجل تفادي ما يُعتبر على نطاق واسع مرضاً خفيفاً نسبيّاً. ولعلّ الأهمّ من ذلك أنّ النماذج الرياضيّة تُثبت أنّ عزل الأطفال الأصحّاء من شأنه أن يؤجّل التاريخ الذي سيلتقطون فيه المرض إلى سنّ أكبر، الأمر الذي سيزيد من خطورة المضاعفات الناجمة عن الجدري. وربّما ما كنّا لنفهم تماماً الآثار العكسية لاستراتيجيّة معقولة ظاهرياً، مثل العزل، لولا تدخّل الرياضيّات.

إذا كان للحجر الصحّي والعزل عواقب غير متوقّعة مع بعض الأمراض، فهي غير مجدية على الإطلاق مع أمراض أخرى. إذ حدّدت النماذج الرياضيّة لانتشار الأمراض أنّ درجة نجاح استراتيجيّة الحجر الصحّي تعتمد على توقيت ذروة العدوى[153]. فإذا كان المرض معدياً على نحو كبير في المراحل المبكرة، عندما يكون بلا أعراض، فبإمكان المرضى نشر العدوى إلى غالبية ضحاياهم المتوقّعين قبل أن يتمّ عزلهم. لحسن الحظّ، في حالة الإيبولا، تحدث غالبية عمليّة انتقال المرض بعض ظهور الأعراض على المرضى وعزلهم، وهذا من حسن الحظّ لأنّ كثيراً من طرق التحكّم الأخرى بالمرض ليس متاحاً.

في الواقع، تمتدّ فترة العدوى بفيروس الإيبولا إلى أقصى درجة، بحيث تبقى الأحمال الفيروسية للضحايا مرتفعة حتّى بعد وفاتهم. فيبقى المتوفّى قادراً على نقل العدوى إلى الأشخاص الآخرين الذين يحتكّون بالجثّة. والجدير بالذكر، أنّ جنازة إحدى المعالجات التقليديات في سيراليون كانت إحدى النقاط الرئيسة لبداية انتشار المرض. فمع تزايد الحالات بسرعة في جميع أنحاء غينيا، أصبح الناس أكثر يأساً. هكذا عمد مرضى الإيبولا إلى عبور الحدود من غينيا إلى سيراليون لاستشارة المعالجة الشهيرة التي سمعوا الكثير عن قواها، اعتقاداً منهم أنّها قادرة على علاج المرض. ولا عجب أنّ المعالِجة سرعان ما مرضت وتوفّيت. جذبت جنازتها مئات المشيّعين على مدار أيّام، ومارسوا جميعاً طقوس الجنازة التقليدية بما في ذلك غسل الجثّة ولمسها. فارتبط ذلك الحدث الوحيد بشكل مباشر بأكثر من 350 حالة وفاة بالإيبولا، كما سهّل انتشار العدوى بشكل كامل في سيراليون.

في عام 2014، في ذروة تفشّي فيروس إيبولا تقريباً، خلصت دراسة رياضيّة إلى أنّ نحو 22% من حالات الإيبولا الجديدة تعزى إلى ضحايا المرض المتوفّين. وأشارت الدراسة نفسها إلى أنّه من خلال الحدّ من الممارسات التقليدية، بما في ذلك طقوس الدفن، يمكن تخفيض عدد التكاثر الأساسي إلى مستوى يصبح فيه التفشّي غير مستدام. واشتملت أهمّ التدخّلات التي فرضتها حكومات غرب أفريقيا والمنظّمات الإنسانية العاملة في المنطقة على تقييد إجراءات الجنازة التقليدية وضمان حصول جميع ضحايا الإيبولا على مدافن آمنة وكريمة. هكذا، وبالاقتران مع الحملات التثقيفية التي توفّر بدائل للممارسات التقليدية غير الآمنة وفرض قيود على السفر حتّى على الأفراد الذين يبدو أنّهم يتمتّعون بصحّة جيّدة، تمّ احتواء انتشار فيروس إيبولا في النهاية. وفي 9 يونيو من عام 2016، أي بعد عامين ونصف تقريباً من إصابة إيميل أومونو، تمّ الإعلان عن القضاء على وباء إيبولا في غرب أفريقيا.

مناعة القطيع

بالإضافة إلى المساعدة بشكل ناشط في معالجة الأمراض المعدية، من شأن النماذج الرياضية للأوبئة أن تساعدنا أيضاً على فهم السمات غير العادية لأمراض مختلفة. على سبيل المثال، ثمّة عدد من الأسئلة المثيرة للاهتمام التي تحيط بأمراض الطفولة مثل النكاف والحصبة الألمانية: لماذا تكتسحنا هذه الأمراض بشكل دوري وتطال الأطفال فقط؟ هل لديها ميل معيّن نحو

خاصّية طفولية غامضة؟ ولماذا استمرّت لفترة طويلة في مجتمعنا؟ هل تبقى كامنة لبضع سنوات، وترتاح بين التفشّيات الكبرى لتضرب أكثرنا ضعفاً؟

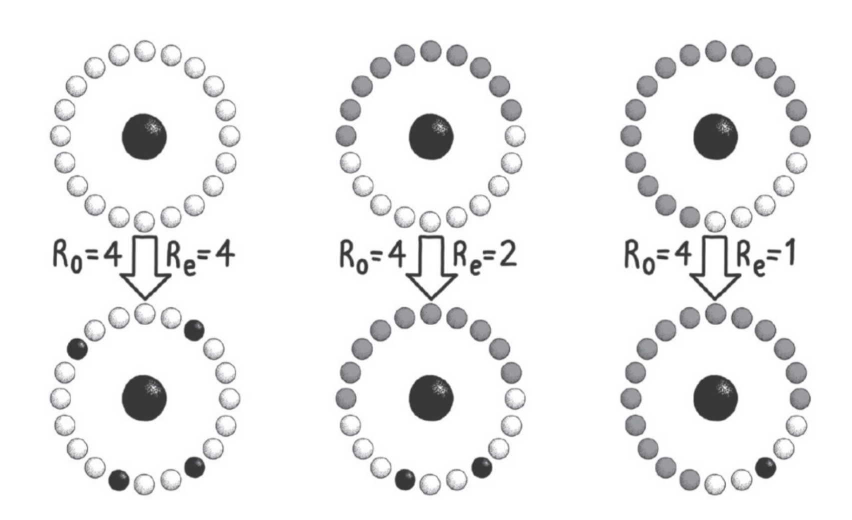
يرجع سبب أنماط التفشّي الدورية النموذجية لأمراض الطفولة لدى الصغار إلى كون عدد التكاثر الفعلي يتغيّر بمرور الوقت مع تعداد الأفراد المعرّضين للإصابة. فبعد التفشّي الكبير لعدوى مثل الحمّى القرمزية بين شرائح واسعة من الأطفال غير المحميين، فإنّ المرض لا يختفي ببساطة. بدلاً من ذلك، فهو يبقى كامناً لدى السكّان، ولكن بعدد تكاثر فعلي يقارب 1. وهكذا يدعم المرض نفسه فقط. مع مرور الوقت، يتقدّم السكّان في السنّ ويولد أطفال جدد غير محميين. ومع نموّ الجزء غير المحميّ من السكّان، يصبح عدد التكاثر الفعلي أعلى فأعلى، ممّا يزيد من احتمال تفشّي المرض مجدّداً. وعندما ينطلق المرض أخيراً، يكون ضحاياه عادةً من ضمن الشرائح الأصغر سنّاً وغير المحميين من السكّان، لأنّ معظم السكّان الأكبر سنّاً يتمتعّون أساساً بالحصانة بسبب تعرّضهم للمرض. ويحصل الأشخاص الذين لم يصابوا بالمرض في طفولتهم على بعض الحماية من خلال عدم تآخيهم مع عدد كبير من الفئة العمرية المصابة.

إنّ فكرة كون عدد كبير من الأفراد المحصّنين ضدّ المرض قادرين على إبطاء أو حتّى وقف انتشار المرض، كما هو الحال مع فترات الركود الفاصلة بين حالات تفشّي أمراض الطفولة، هو مفهوم رياضي يعرف باسم «مناعة القطيع». المثير للدهشة أنّ هذا التأثير المجتمعي لا يتطلّب من الجميع أن يكونوا محصّنين ضدّ المرض ليكون كلّ السكّان محميين. فعن طريق خفض عدد التكاثر الفعلي إلى أقلّ من واحد، يمكن كسر سلسلة انتقال المرض وإيقافه. تعني مناعة القطيع أنّ الأشخاص الذين يملكون أجهزة مناعية ضعيفة جدّاً لاحتمال اللقاح، بما في ذلك كبار السنّ والأطفال حديثي الولادة والنساء الحوامل والمصابين بفيروس نقص المناعة البشرية، قادرون على الاستفادة من الحماية التي توفّرها اللقاحات. وتختلف عتبة الجزء المحصّن المطلوبة لحماية الجزء القابل للإصابة باختلاف مدى قوّة العدوى. ويكمن سرّ حجم تلك النسبة في عدد التكاثر الأساسي، R0.

فلنأخذ مثالاً على ذلك، الشخص المصاب بسلالة حادّة من الأنفلونزا والموضح في الشكل 24. إذا قابل هذا الشخص 20 آخرين معرّضين للإصابة خلال الأسبوع الذي تكون فيه العدوى ناشطة، وأصيب أربعة منهم بالعدوى، فإنّ عدد التكاثر الأساسي للمرض، أي R0، يبلغ 4. وهكذا فإنّ كلّ شخص معرّض للإصابة يملك واحدة من بين 5 فرص لالتقاط العدوى. يوضح ذلك كيف يعتمد رقم التكاثر على حجم السكّان المعرّضين للإصابة. فإذا لم يقابل مريض الإنفلونزا في مثالنا سوى 10 أشخاص معرّضين للإصابة خلال الأسبوع الذي كانت فيه العدوى ناشطة (كما في اللوحة

الوسطى من الشكل 24)، مع بقاء احتمال انتقال العدوى على حاله، فإنّه سينقلها إلى اثنين فقط منهم، في المتوسّط، لينخفض بذلك عدد التكاثر الفعلي من 4 إلى 2.

أنجح وسيلة لخفض حجم السكّان المعرّضين للإصابة هي التحصين. ويعتمد عدد الأشخاص الذين ينبغي تلقيحهم من أجل تحقيق مناعة القطيع على خفض عدد التكاثر الفعلي إلى ما دون 1. فإذا كان بإمكاننا تلقيح 3/ 4 من السكّان (كما في الحالة إلى يمين الشكل 24)، فإنّ من بين الـ 20 شخصاً الأصليين الذين احتكّ بهم مريض الإنفلونزا في مثالنا خلال أسبوع، سيبقى 1/ 4 فقط (أي 5) عرضة للإصابة. في المتوسّط، واحد منهم فقط سيصاب بالعدوى. وليس من قبيل المصادفة أنّ عتبة التحصين الحرجة هذه، لتحقيق مناعة القطيع لمرض ذي رقم تكاثر أساسي يبلغ 4، تتطّلب تحصين 3/ 4 السكّان. بشكل عامّ، لا يمكننا أن نحتمل ترك أكثر من 1/ R0 من السكّان بدون تلقيح، ويجب حماية الجزء المتبقّي (1 - 1/ R0 من السكّان) إذا أردنا تحقيق عتبة مناعة القطيع. بالنسبة إلى الجدري، الذي يبلغ عدد التكاثر الأساسي فيه نحو 4، يمكننا ترك 1/ 4 (أو نحو 25%)، من السكّان غير محميّين. هكذا كان تلقيح 80% فقط (5% أعلى من عتبة التحصين البالغة 75% لتوفير عازل) من السكّان المعرّضين للإصابة ضدّ الجدري كافياً في عام 1977 لاستكمال واحدة من أعظم إنجازات جنسنا - ألا وهي القضاء تماماً على مرض بشري عن وجه الأرض. ولم يتكرّر هذا الإنجاز أبداً.



الشكل 24: يلتقي فرد معدٍ واحد (أسود) بـ 20 شخصاً معرّضين للإصابة (أبيض) أو محصّنين (رمادي)، خلال الأسبوع الأوّل الذي تكون فيه العدوى ناشطة. في ظلّ عدم وجود أيّ شخص محصّن (يسار) يصيب الفرد المعدي الواحد 4 آخرين، ما يعني أنّ عدد التكاثر الأساسي هو 4. عندما يتمّ تحصين نصف السكّان (وسط) يصاب شخصان معرّضان للإصابة فقط. هكذا ينخفض عدد التكاثر الفعلي، Re، إلى 2. أخيراً (يمين) عندما يتمّ تحصين 3/ 4

من السكّان، يصاب شخص واحد في المتوسّط. وهكذا ينخفض عدد التكاثر الفعلي إلى القيمة الحرجة 1.

أدّت الآثار الخطيرة والمعوّقة لعدوى الجدري وحدها إلى جعل هذا المرض هدفاً مناسباً للقضاء عليه تماماً. كما أنّ عتبة التحصين الحرجة المنخفضة جعلت منه هدفاً سهلاً نسبيّاً. إذ يصعب التحصين ضدّ كثير من الأمراض لأنّها تنتشر بسهولة أكبر. فجدري الماء، الذي يقدّر عدد تكاثره الأساسي بنحو 10، يتطلّب تحصين تسعة أعشار السكّان لحماية بقيّة السكّان بشكل فاعل والقضاء على المرض. أمّا الحصبة، التي تُعتبر من أكثر الأمراض التي تصيب الإنسان عدوى على وجه الأرض، حيث يتراوح عدد تكاثرها الأساسي بين 12 و18، فتحتاج إلى تحصين ما يتراوح بين 92% و95% من السكّان. وقد أشارت دراسة أجريت حول انتشار مرض الحصبة في ديزني لاند عام 2015 - والذي أصيب فيه موبيوس لوب - إلى أنّ معدّلات التلقيح بين الأشخاص المعرّضين للإصابة بالمرض لم تتجاوز 50%، أي أقلّ بكثير من الحدّ الأدنى المطلوب لتحقيق مناعة القطيع.

اللقاح الثلاثي

شهد معدّل التحصين في إنكلترا ضدّ الحصبة، من خلال اللقاح الثلاثي ضدّ الحصبة والنكاف والحصبة الألمانية مجتمعة، ارتفاعاً مطّرداً منذ إدخاله في عام 1988. وفي عام 1996، بلغ معدّل التلقيح رقماً قياسياً هو 91.8%، وهذا يقارب عتبة التحصين الحرجة للتخلّص من الحصبة. لكن في عام 1998، حدث أمر أخرج عملية التلقيح عن مسارها خلال السنوات التالية.

لم يكن سبب هذه الكارثة التي وقعت على صعيد الصحّة العامّة يرجع إلى حيوانات موبوءة بالأمراض، أو إلى سوء الصرف الصحّي، أو حتّى فشل في السياسة الحكومية، بل مقالة مؤلّفة من خمس صفحات نُشرت في المجلّة الطبّية *ذا لانسيت*. ففي الدراسة، اقترح المؤلّف الرئيس أندرو ويكفيلد وجود صلة بين اللقاح الثلاثي واضطرابات طيف التوحّد. ودعم النتائج التي توصّل إليها بحملة شنّها شخصيّاً لمكافحة اللقاح الثلاثي، معلناً في مؤتمر صحفي، «لا يمكنني أن أدعم الاستخدام المتواصل لهذه اللقاحات الثلاثة مجتمعة حتّى يتمّ حلّ هذه المشكلة». ولم يستطع الإعلام السائد مقاومة الطعم.

من بين العناوين الرئيسة لصحيفة *ديلي ميل* التي قامت بتغطية القصّة «اللقاح الثلاثي قتل ابنتي»، و«المخاوف من اللقاح الثلاثي تكتسب الدعم»، و«هل اللقاح الثلاثي آمن؟ هراء. هذه

فضيحة تزداد سوءاً». في السنوات التي أعقبت مقالة ويكفيلد، تضخّمت القصّة وأصبحت أكبر قصّة علمية في المملكة المتّحدة في عام 2002. وبينما نقلت الصحافة بالتفصيل مخاوف العديد من الآباء والأمّهات، لم تذكر التغطية الإعلامية للقصّة أنّ دراسة ويكفيلد أجريت على 12 طفلاً فقط، وهذه مجموعة صغيرة للغاية لتستخلص من خلالها استنتاجات واسعة النطاق. وأيّ تغطية تهدف إلى التحذير من مصداقية الدراسة طغت عليها صفارات الإنذار التي أطلقتها معظم وسائل الإعلام. بالنتيجة، بدأ الآباء بسحب الإذن لتلقيح أطفالهم. وفي السنوات العشر التي تلت نشر مقالة *لانسيت*، انخفض معدّل أخذ اللقاح الثلاثي من أكثر من 90% إلى ما دون 80%. هكذا ارتفعت الحالات المؤكّدة من الحصبة من 56 حالة في عام 1998 إلى أكثر من 1300 حالة بعد عشر سنوات. كما تضاعفت فجأة حالات الإصابة بالنكاف، التي أصبحت أقلّ انتشاراً خلال التسعينيات.

في عام 2004، مع استمرار حالات الحصبة والنكاف والحصبة الألمانية في بالتزايد، سعى أحد الصحفيين، ويدعى بريان دير، إلى كشف عمل ويكفيلد على أنّه مزوّر. وذكر دير أنّه قبل أن يقدّم ويكفيلد مقالته، تلقّى أكثر من 400,000 جنيه استرليني من محامين يبحثون عن أدلّة ضدّ شركات الأدوية التي تصنّع اللقاحات. كما كشف دير أيضاً عن مستندات أظهرت أنّ ويكفيلد قدّم براءات اختراع للقاح منافس للقاح الثلاثي. وادّعى دير بشكل حاسم أنّ لديه أدلّة على أنّ ويكفيلد تلاعب بالبيانات التي تشتمل عليها مقالته لإعطاء انطباع خاطئ عن وجود علاقة بين اللقاح ومرض التوحّد. أدّت أدلّة دير على ارتكاب ويكفيلد احتيالاً علمياً وتضارباً شديداً في المصالح إلى قيام محرّري *ذا لانسيت* بسحب المقالة المسيئة. وفي عام 2010، تمّ استبعاد ويكفيلد من السجلّ الطبّي من قبل المجلس الطبّي العام. خلال العشرين عاماً التي انقضت منذ نشر مقالة ويكفيلد، أجريت 14 دراسة شاملة على الأقلّ على مئات الآلاف من الأطفال في جميع أنحاء العالم، ولم يتمّ العثور على أيّ دليل على وجود صلة بين اللقاح الثلاثي ومرض التوحّد. لكن مع الأسف، ما زال تأثير ويكفيلد مستمرّاً.

* * *

على الرغم من أنّ اللقاح الثلاثي في المملكة المتّحدة عاد إلى مستوياته السابقة، إلاّ أنّ معدّلات التلقيح في أنحاء العالم المتقدّم ككلّ آخذة في الانخفاض، وحالات الحصبة إلى تزايد. فقد شهدت أوروبا في عام 2018، أكثر من 60,000 حالة إصابة بالحصبة، منها 72 حالة مميتة - وهذا ضعف العدد الذي شهده العام السابق. في المقام الأوّل، يعتبر ذلك نتيجة لظهور الحركة المتنامية لمكافحة التلقيح. تُدرج منظّمة الصحّة العالمية ما تسمّيه «التردّد إزاء التلقيح" على أنّه واحد من

أكبر عشرة تهديدات صحّية عالمية لعام 2019. وتعزو صحيفة واشنطن بوست، من بين وسائل إعلام أخرى، صعود «مناهضي اللقاحات» مباشرةً إلى ويكفيلد، واصفة إيّاه على أنّه «مؤسّس حركة مكافحة التلقيح الحديثة». مع ذلك، فإنّ مذاهب الحركة قد توسّعت إلى ما هو أبعد من اكتشافات ويكفيلد. وهي تتراوح من التأكيدات على أنّ اللقاحات تحتوي على مستويات خطرة من المواد الكيميائية السامّة إلى الادّعاءات بأنّ اللقاحات تصيب الأطفال بالفعل بالأمراض التي تحاول علاجها. في الواقع، يتمّ إنتاج المواد الكيميائية السامّة مثل الفورمالديهايد بكمّيات أعلى عن طريق نظامنا الأيضي من الكمّيات ضئيلة الموجودة في اللقاحات. وبالمثل، فإنّ اللقاحات التي تسبّب المرض الذي صُمّمت للوقاية منه هي أمر نادر الحدوث للغاية، خاصّة لدى الأشخاص الأصحّاء.

على الرغم من العديد من الأدلّة المقنعة الداحضة لمزاعمهم، إلّا أنّ الخطاب «المناهض للتلقيح» قد ارتفع إلى حدّ كبير نتيجة الدعم الذي تلقّاه من مشاهير بارزين، بمن فيهم جيم كاري، وتشارلي شين، ودونالد ترامب. وفي تطوّر غير قابل للتصديق تقريباً، أكّد ويكفيلد في عام 2018 اكتسابه الشهرة عندما بدأ بمواعدة عارضة الأزياء السابقة إيلي ماكفيرسون.

بالإضافة إلى صعود الناشط الشهير، ظهرت وسائل التواصل الاجتماعي، التي سمحت لتلك الشخصيات بنشر وجهات نظرها مباشرة إلى جماهيرها وبشروطها الخاصّة. ومع تآكل الثقة في وسائل الإعلام الرئيسة، يلجأ الناس بشكل متزايد إلى تلك الوسائل ليستمدّوا الطمأنينة. وقد أتاح ظهور هذه المنصّات البديلة مساحة للحركة المناهضة للتلقيح لكي تنمو من دون تهديد أو تحدٍ من جانب العلم المبنيّ على الأدلّة. وقد وصف ويكفيلد نفسه ظهور وسائل التواصل الاجتماعي بأنّها «تطوّرت بشكل جميل» ربّما لخدمة أغراضه.

* * *

جميعنا لدينا خيارات نتّخذها تؤثّر على احتمال إصابتنا بأمراض معدية، سواء قضاء عطلة في بلدان استوائية، أو مع من نسمح لأولادنا باللعب، أو ما إذا كنّا نتنقّل في وسائل النقل العامّ المزدحمة. وعندما نكون مرضى، فإنّ خيارات أخرى نتّخذها تؤثّر على احتمال نقل أمراضنا إلى الآخرين: ما إذا كنّا سنلغي لقاء طال انتظاره مع الأصدقاء، أو سنبقي أطفالنا في المنزل ونمنعهم من الذهاب إلى المدرسة، أو ما إذا كنّا نغطّي أفواهنا عندما نسعل. لا يمكن اتّخاذ القرار الحاسم في ما يتعلّق بتلقيح أنفسنا وعائلاتنا إلّا مسبقاً. وهذا يؤثّر على فرصنا، ليس فقط في التقاط الأمراض، بل وأيضاً في نقلها إلى الآخرين.

بعض هذه القرارات غير مكلف، ممّا يجعل تبنّيها واضحاً. فنحن لن نخسر شيئاً إذا عطسنا في منديل. وقد تبيّن أنّ الإجراء البسيط المتمثّل في غسل يديك بشكل متكرّر يقلّل من أعداد التكاثر الفعلية لأمراض الجهاز التنفّسي، مثل الأنفلونزا، بنسبة تصل إلى 3/ 4. وبالنسبة إلى بعض الأمراض، قد يكون هذا كافياً لينقلنا إلى ما وراء عتبة R0 التي لا يمكن أن يتفشّى عندها مرض معدٍ.

بالمقابل، ثمّة قرارات أخرى تشكّل أكثر من معضلة. فمن المغري دائماً إرسال الأطفال إلى المدرسة حتّى لو علمنا أنّ ذلك يزيد من عدد الاتّصالات المعدية المحتملة، وبالتالي يرفع من احتمال حدوث وباء. علينا إذاً أن نفهم المخاطر والعواقب الكامنة في صميم جميع خياراتنا.

يوفّر علم الأوبئة الرياضي طريقة لتقييم وفهم هذه القرارات. وهذا يفسّر لماذا يجدر بالجميع عدم الذهاب إلى المدرسة أو العمل أثناء المرض. كما يخبرنا كيف ولماذا يساعدنا غسل الأيدي على منع تفشّي الأمراض عن طريق الحدّ من قوّة العدوى. وفي بعض الأحيان، وعلى نحو غير بديهي، يمكن أن يسلّط الضوء على أنّ أكثر الأمراض المخيفة ليست هي دائماً الأمراض التي يجب أن نقلق بشأنها.

على نطاق أوسع، يشير هذا العلم إلى استراتيجيّات لمعالجة تفشّي الأمراض والتدابير الوقائية التي يمكننا اتّخاذها لتجنّبها. فبالاقتران مع الأدلّة العلمية الموثوقة، يوضح علم الأوبئة الرياضي الأهمية البالغة للتلقيح. فهو لا يحميك أنت فحسب، بل يحمي عائلتك وأصدقائك وجيرانك وزملاءك. وتُظهر أرقام منظّمة الصحّة العالمية أنّ اللقاحات تمنع ملايين الوفيات كلّ عام، ويمكن أن تمنع ملايين أخرى إذا تمكنّا من تحسين التغطية العالمية. إنّها أفضل طريقة لدينا لمنع تفشّي الأمراض القاتلة، والفرصة الوحيدة المتاحة لنا لإنهاء آثارها المدمّرة إلى الأبد. بالتالي، يشكّل علم الأوبئة الرياضي بصيص أمل للمستقبل، والمفتاح الذي يمكن أن يكشف أسرار كيفيّة تحقيق هذه المهام الضخمة.

خاتمة

التحرّر الرياضي

لقد صاغت الرياضيّات تاريخنا: من خلال الأسلاف الذين فازوا بلعبة أرقام التطوّر والأمراض التي ضغطت على جنسنا وقامت بتصفيته. وتعكس بيولوجيّتنا قواعد الرياضيّات الثابتة التي لا تتغيّر. في الوقت نفسه، تحوّلت جماليّاتنا الرياضيّة لتعكس علم وظائف الأعضاء لدينا، وتطوَّر فهمنا الرياضي معنا على مرّ ملايين السنين ليبلغ وضعه الحالي.

في مجتمع اليوم، تدعم الرياضيّات كلّ ما نقوم به تقريباً، كما تعدّ حيويّة للطرق التي نتواصل بها مع بعضنا البعض والتي نستخدمها لنتنقّل من مكان إلى آخر. لقد غيّرت تماماً كيفية البيع والشراء، وأحدثت ثورة في طرق العمل أو الاسترخاء. ويمكن الشعور بنفوذها في كلّ قاعة محكمة تقريباً، وفي كلّ جناح مستشفى، وكلّ مكتب، وكلّ منزل.

يتمّ استخدام الرياضيّات يوميّاً لتحقيق مهام لم يكن من الممكن تصوّرها سابقاً. إذ تتيح لنا الخوارزميّات الرياضية المتطوّرة العثور على إجابة على أيّ سؤال تقريباً في غضون ثوانٍ. ويتمّ ربط الناس في جميع أنحاء العالم خلال لحظة واحدة من خلال القوّة الرياضية للإنترنت. كما يستخدم حرّاس العدالة الرياضيّات كقوّة للخير عند اكتشاف المجرمين من خلال علم الآثار الجنائي.

مع ذلك، يجب أن نتذكّر أنّ الرياضيّات حميدة بقدر الشخص أو الأشخاص الذين يستخدمونها. فبعد كلّ شيء، الرياضيّات نفسها التي استخدمها مزوّر الفنّ هان فان ميغيرين هي التي أعطتنا القنبلة الذرّية. ومن الواضح أنّنا يجب أن نسعى جاهدين لفهم الآثار الكاملة للأدوات الرياضيّة التي نُخضع أنفسنا لها في كثير من الأحيان. فما يبدأ بتوصيات الأصدقاء والإعلانات المخصّصة، قد ينتهي بنشر أخبار وهمية، أو تقلّص خصوصيّتنا.

مع تحوّل الرياضيّات إلى جزء طاغٍ من حياتنا اليومية، تتضاعف فرص وقوع كارثة غير متوقّعة. فمقابل تقديرنا للاستخدامات الرائعة للرياضيّات لتحقيق مآثر ما كان من الممكن تصوّرها، رأينا أيضاً العواقب الكارثية للأخطاء الرياضيّة. ربّما تكون الرياضيّات الحذرة قد أوصلت الإنسان إلى سطح القمر، لكنّ الرياضيّات المهمِلة دمّرت مكّوك مارس الذي بلغت تكلفته ملايين الدولارات.

بالتالي، عند التعامل مع الرياضيّات بشكل مناسب، من شأنها أن تكون أداة فاعلة للتحليل الجنائي، ولكن عند إساءة استعمالها من قبل صغار الضبّاط عديمي الضمير، يمكن لذلك أن يكلّف الأبرياء حرّيتهم. إذاً، في أفضل الحالات، تُعتبر الرياضيّات أحدث أداة تستخدمها التكنولوجيا الطبّية لإنقاذ الأرواح. أمّا في أسوأ الأحوال، فإنّها الجرعات الخاطئة التي تقضي عليها. ومن واجبنا أن نتعلّم من الأخطاء الرياضيّة حتّى لا نقع فيها مجدّداً في المستقبل، لا بل ونجعلها غير قابلة للتكرار إطلاقاً.

من شأن النمذجة الرياضيّة أن تعطينا فكرة عمّا سيكون عليه ذلك المستقبل. إذ لا تكتفي النماذج الرياضية بوصف العالم كما هو - البيانات التي تتمّ معايرتها على أساسها - بل توفّر درجة من قوّة الإدراك. ويسمح لنا علم الأوبئة الرياضي بالاطّلاع على مستقبل تطوّر المرض واتّخاذ تدابير وقائية استباقية، بدلاً من الاكتفاء بالألعاب التفاعلية للحاق بالركب. فيما يمكن أن يوفّر لنا التوقّف الأمثل الفرصة الأفضل لاتّخاذ الخيار الأفضل، عندما لا يُسمح لنا برؤية جميع الخيارات مسبقاً. ومن شأن علم الجينوم الشخصي أن يُحدث ثورة في فهم مخاطر المرض في المستقبل، ولكن فقط إذا تمكنّا من توحيد الرياضيّات التي نفسّر بها النتائج.

كانت الرياضيّات، وما زالت، وستبقى تيّاراً غير مرئي تقريباً، كامناً تحت سطح شؤوننا وأعمالنا. مع ذلك، يجب أن نتوخّى الحذر في عدم الانجراف وراء محاولة توسيع تطبيقها بشكل يتجاوز اختصاصها. فثمّة أماكن تكون فيها الرياضيّات الأداة الخاطئة تماماً لأداء الوظيفة، وهي أنشطة يُعتبر فيها الإشراف البشري ضروري. وحتّى عند تعذّر تنفيذ بعض المهامّ العقلية الأكثر تعقيداً باستخدام إحدى الخوارزميّات، فإنّه من المستحيل تقسيم مسائل القلب إلى مجموعة بسيطة من القواعد. فما من رمز أو معادلة من شأنها محاكاة التعقيدات الحقيقية للحالة الإنسانية.

مع ذلك، من شأن المعرفة الرياضيّة القليلة في مجتمعنا الكمّي بشكل متزايد أن تساعدنا على تسخير قوّة الأرقام لصالحنا. إذ تسمح لنا القواعد البسيطة باتّخاذ أفضل الخيارات وتجنّب أسوأ الأخطاء. كما تساعدنا التغييرات الصغيرة في طريقة تفكيرنا في بيئاتنا سريعة التطوّر على «الحفاظ على الهدوء» في مواجهة التغيير المتسارع، أو التكيّف مع واقعنا الآلي بشكل متزايد. من شأن النماذج الأساسيّة لأفعالنا وردود أفعالنا وتفاعلاتنا أن تعدّنا للمستقبل مسبقاً. والقصص التي تروي تجارب الآخرين هي، برأيي، أبسط وأقوى النماذج على الإطلاق. فهي تتيح لنا التعلّم من أخطاء أسلافنا، وبذلك نتأكّد من أنّنا نتحدّث جميعاً اللغة نفسها، وأنّنا قمنا بمزامنة ساعاتنا، وتأكّدنا من وجود وقود كافٍ في الخزّان، قبل الشروع في أيّ رحلة استكشافية رقمية.

إنّ نصف معركة التمكين الرياضي تتمثّل في التجرّؤ على التشكيك في السلطة المتصوّرة لأولئك الذين يستخدمون الأسلحة - محطّمين وهم اليقين. فتقدير المخاطر المطلقة والنسبيّة، والتحيّزات النسبية، والتأطير غير المتكافئ، والانحياز يمنحنا القدرة على التشكيك في الإحصائيّات التي تزوّدنا بها عناوين الصحف، أو «الدراسات» المدفوعة إلينا في الإعلانات، أو أنصاف الحقائق التي يتفوّه بها سياسيونا. كما أنّ إدراك المغالطات البيئية والأحداث التابعة يسمح لنا بتبديد سحب الدخان الغامض، الأمر الذي يجعل من الصعب خداعنا بالحجج الرياضيّة، سواء في قاعة المحكمة أو في الفصل الدراسي أو العيادة.

علينا أن نضمن عدم فوز الشخص الذي يملك الإحصائيّات الأكثر إثارة للصدمة بالحجّة دائماً، وذلك من خلال المطالبة بتفسير للرياضيّات الكامنة خلف الأرقام. ويجب ألّا نسمح للمشعوذين الطبّيين بتأخيرنا عن تلّقي علاج ينقذ الأرواح عندما تكون علاجاتهم البديلة مجرّد انكفاء إلى الوسط. كما يجب ألّا نسمح لمناهضي اللقاحات ببثّ الشكوك حيال فاعليّة اللقاحات، عندما تُثبت الرياضيّات أنّها تستطيع إنقاذ الأرواح الضعيفة والقضاء على الأمراض.

لقد حان الوقت لنقبض مجدّداً على زمام السلطة، لأنّ الرياضيّات في بعض الأحيان هي بالفعل مسألة حياة أو موت.

Notes

[1←]

By providing an estimate of the number of fish in a lake' Pollock , K . H. (1991).'
Modeling capture, recapture, and removal statistics for estimation of demographic parameters for fish and wildlife populations: past, present, and future. Journal of the American Statistical A ssociation, 86(413), 225. https://doi.org /10.2307/2289733

[2←]

numbers of drug addicts' Doscher, M. L., & Woodward, J. A . (1983). Estimating the'
size of subpopulations of heroin users: applications of log-linear models to capture/ .recapture sampling. The International Journal of the Addictions, 18(2), 167-82

Hartnoll, R ., Mitcheson, M., Lewis, R ., & Br yer, S. (1985). Estimating the prevalence of opioid dependence. Lancet, 325(8422), 203-5. https://doi. org S0140-6736(85)92036-7/10.1016/

Woodward, J. A ., Retka, R . L., & Ng, L. (1984). Construct validity of heroin abuse estimators. International Journal of the Addictions, 19(1), 93-117. https://doi.org 10.3109/10826088409055819/

[3←]

'the number of war dead in Kosovo'

Spagat, M. (2012). Estimating the Human Costs of War: The Sample Survey Approach. Oxford University Press. https://doi.org /10.1093/ oxfordhb/9780195392777.013.0014

[4←]

Strep f. is one of the bacteria responsible for the souring and curdling of milk , but one'
'?cell is no big deal, right

Botina, S. G., Lysenko, A . M., & Sukhodolets, V. V. (2005). Elucidation of the taxonomic status of industrial strains of thermophilic lactic acid bacteria by sequencing of 16S rRNA genes. Microbiology, 74(4), 448-52. https://doi.org s11021-005-0087-7/10.1007/

[5←]

Maybe it’s more worr ying when you find out that, in milk , Strep f. cells can divide to‘ produce two daughter cells ever y hour’ Cárdenas, A . M., Andreacchio, K . A ., & Edelstein, P. H. (2014). Prevalence and detection of mixed-population enterococcal bacteremia. Journal of Clinical Microbiology, 52(7), 2604-8. https://doi.org JCM.00802-14 /10.1128/

Lam, M. M. C., Seemann, T., Tobias, N. J., Chen, H., Haring, V., Moore, R . J., . . . Stinear, T. P. (2013). Comparative analysis of the complete genome of an epidemic hospital sequence type 203 clone of vancomycin- resistant Enterococcus faecium. BMC Genomics, 14, 595. https://doi. org /10.1186/1471-2164-14-595

[6←]

He published in the journal Nature evidence that, upon fission caused by a single‘ neutron, atoms of the uranium isotope, U-235, emitted on average 3.5 (later revised ’to 2.5) high energy neutrons

Von Halban, H., Joliot, F., & Kowarski, L. (1939). Number of neutrons liberated in the nuclear fission of uranium. Nature, 143(3625), 680. https:// doi.org 10.1038/143680a0/

[7←]

’the other isotope, which makes up 99.3% of naturally occurring uranium‘

Webb, J. (2003). Are the laws of nature changing with time? Physics World, 16(4), https://doi.org /10.1088/2058-7058/16/4/38 .8–33

[8←]

One kilogram of uranium can release roughly three million times more energy than‘ ’.burning the same amount of coal

Bernstein, J. (2008). Nuclear Weapons: What You Need to Know. Cambridge .University Press

[9←]

The fire drew into the atmosphere hundreds of times more radioactive material than‘ had been released during the bombing of Hiroshima, causing widespread ’.environmental consequences for almost all of Europe

International Atomic Energy Agency. (1996). Ten years after Chernobyl: what do we really know? In Proceedings of the IAE A / WHO/EC International Conference: One Decade after Chernobyl: Summing Up the Consequences. Vienna: International .Atomic Energy Agency

[10←]

’ the elimination of drugs in the body‘

Greenblatt, D. J. (1985). Elimination half-life of drugs: value and limitations. Annual Review of Medicine, 36(1), 421-7. https://doi.org annurev.me.36.020185.002225/10.1146/

Hastings, I. M., Watkins, W. M., & White, N. J. (2002). The evolution of drug-resistant malaria: the role of drug elimination half-life. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 357(1420), 505-19. https://doi.org /10.1098/rstb.2001.1036

[11←]

’the rate of decrease of the head on a pint of beer‘

Leike, A . (2002). Demonstration of the exponential decay law using beer froth. European Journal of Physics, 23(1), 21-6. https://doi. org /10.1088/0143-0807/23/1/304

Fisher, N. (2004). The physics of your pint: head of beer exhibits exponential decay. Physics Education, 39(1), 34-5. https://doi. org /10.1088/0031-9120/39/1/F11

[12←]

In particular, it does an excellent job of describing the rate at which the levels of‘ ’.radiation emitted by a radioactive substance decrease over time

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). L XIV. The cause and nature of radioactivity. Part II. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(23), 569-85. https://doi.org /10.1080/14786440209462881

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). XLI. The cause and nature of radioactivity. Part I. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(21), 370-96. https://doi.org /10.1080/14786440209462856

[13←]

determining the age of ancient artefacts like the Dead Sea scrolls’ Bonani, G., Ivy, S.,‘ Wölfli, W., Broshi, M., Carmi, I., & Strugnell, J. (1992). Radiocarbon dating of Fourteen Dead Sea Scrolls. Radiocarbon, 34(03), 843-9. https://doi.org S0033822200064158/10.1017/

Carmi, I. (2000). Radiocarbon dating of the Dead Sea Scrolls. In L. Schiffman, E. Tov, & J. VanderKam (eds.), The Dead Sea Scrolls: Fifty Years After Their .(Discovery. 1947-1997 (p. 881

Bonani, G., Broshi, M., & Carmi, I. (1991). 14 Radiocarbon dating of the Dead Sea .scrolls. 'Atiqot, Israel Antiquities Authority

[14←]

'archaeopter yx was 150 million years old'

Starr, C., Taggart, R ., Evers, C. A ., & Starr, L. (2019). Biology: The Unity and .Diversity of Life, Cengage Learning

[15←]

'Ötzi the iceman died 5300 years ago'

Bonani, G., Ivy, S. D., Hajdas, I., Niklaus, T. R ., & Suter, M. (1994). Ams 14C age determinations of tissue, bone and grass samples from the ötztal ice man. Radiocarbon, 36(02), 247-250. https://doi.org /10.1017/ S0033822200040534

[16←]

This established for certain that Van Meegeren's forgeries couldn't have been painted' by Vermeer in the 17th centur y as the lead which Van Meegeren used for his paints '.had not yet been mined

Keisch, B., Feller, R . L., Levine, A . S., & Edwards, R . R . (1967). Dating and authenticating works of art by measurement of natural alpha emitters. Science, https://doi.org /10.1126/science.155.3767.1238 .1238-42 ,(3767)155

[17←]

As a result of the funding received during the challenge, researchers discovered a third' '.gene responsible for ALS, demonstrating the viral campaign's far-reaching impact

Kenna, K . P., van Doormaal, P. T. C., Dekker, A . M., Ticozzi, N., Kenna, B. J., Diekstra, F. P., . . . Landers, J. E. (2016). NEK1 variants confer susceptibility to amyotrophic lateral sclerosis. Nature Genetics, 48(9), 1037-42. https://doi.org ng.3626/10.1038/

[18←]

Computer scientist Vernor Vinge encapsulated just such ideas in a series of science' 'fiction novels

.Vinge, V. (1986). Marooned in Realtime. Bluejay Books/ St. Martin's Press

.Vinge, V. (1992). A Fire Upon the Deep. Tor Books

Vinge, V. (1993). The coming technological singularity: how to survive in the post-human era. In NAS A . Lewis Research Center, Vision

Interdisciplinary Science and Engineering in the Era of Cyberspace (pp. 11-22). :21 Retrieved from https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19940022856

[19←]

In 1999, in his book The Age of Spiritual Machines, Kurzweil hypothesised the "law of‘ ’."accelerating returns

Kurzweil, R . (1999). The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed .Human Intelligence. Viking

[20←]

He even went so far as to pin the date of Vinge’s "technological singularity " - the point‘ at which we will experience, as Kurzweil describes it, "technological change so rapid and profound it represents a rupture in the fabric of human histor y " - to ’around 2045

Kurzweil, R . (2004). The law of accelerating returns. In Alan Turing: Life and Legacy of a Great Thinker (pp. 381-416). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org 16_10.1007/978-3-662-05642-4/

[21←]

As a result of the funding received during the challenge, researchers discovered a third‘ ’.gene responsible for ALS, demonstrating the viral campaign’s far-reaching impact

Kenna, K . P., van Doormaal, P. T. C., Dekker, A . M., Ticozzi, N., Kenna, B. J., Diekstra, F. P., . . . Landers, J. E. (2016). NEK1 variants confer susceptibility to amyotrophic lateral sclerosis. Nature Genetics, 48(9), 1037–42. https://doi.org ng.3626/10.1038/

[22←]

The complete "Book of Life" was delivered in 2003, ahead of schedule and within its‘ ’.one-billion-dollar budget

Gregor y, S. G., Barlow, K . F., McLay, K . E., Kaul, R ., Swarbreck , D., Dunham, A ., . . . Bentley, D. R . (2006). The DNA sequence and biological annotation of human chromosome 1. Nature, 441(7091), 315-21. https:// doi.org nature04727/10.1038/

International Human Genome Sequencing Consortium. (2001). Initial sequencing and analysis of the human genome. Nature, 409(6822), 860-921. https://doi.org

10.1038/35057062/

Pennisi, E. (2001). The human genome. Science, 291(5507), 1177-80. https://doi.org SCIENCE.291.5507.1177/10.1126/

[23←]

The perceived rapid increase in population at that time prompted the English‘ mathematician, Thomas Malthus, to suggest that the human population grows at a ’.rate that is proportional to its current size

Malthus, T. R . (2008). An Essay on the Principle of Population. (Ed. R . Thomas .and G. Gilbert) Oxford University Press

[24←]

In 1999, in his book The Age of Spiritual Machines, Kurzweil hypothesised the "law of‘ ’."accelerating returns

Kurzweil, R . (1999). The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed .Human Intelligence. Viking

[25←]

’was the first to demonstrate that logistic growth occurred in bacterial populations‘

McKendrick , A . G., & Pai, M. K . (1912). The rate of multiplication of micro- organisms: a mathematical study. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, https://doi.org /10.1017/S0370164600025426 .649-53 ,31

[26←]

’sheep‘

Davidson, J. (1938). On the ecology of the growth of the sheep population in South .Australia. Trans. Roy. Soc. S. A ., 62(1), 11-148

Davidson, J. (1938). On the growth of the sheep population in Tasmania. Trans. .Roy. Soc. S. A ., 62(2), 342-6

[27←]

’seals‘

Jeffries, S., Huber, H., Calambokidis, J., & Laake, J. (2003). Trends and status of harbor seals in Washington State: 1978-1999. The Journal of Wildlife Management, 67(1), 207. https://doi.org /10.2307/3803076

[28←]

’cranes‘

Flynn, M. N., & Pereira, W. R . L. S. (2013). Ecotoxicology and environmental .contamination. Ecotoxicology and Environmental Contamination, 8(1), 75-85

[29←]

The eminent sociobiologist, E. O. Wilson, believes that there‘

are inherent, hard limits on the size of human population that the Earth’s biosphere ’.can support

.Wilson, E. O. (2002). The Future of Life (1st ed.). Alfred A . Knopf

[30←]

’sheep‘

Davidson, J. (1938). On the ecology of the growth of the sheep population in South .Australia. Trans. Roy. Soc. S. A ., 62(1), 11–148

Davidson, J. (1938). On the growth of the sheep population in Tasmania. Trans. .Roy. Soc. S. A ., 62(2), 342–6

[31←]

Our growth rate reached a peak of around 2% per year in the late 1960s, but is‘ ’.projected to fall below 1% per year by 2023

Rafter y, A . E., Alkema, L., & Gerland, P. (2014). Bayesian Population Projections for the United Nations. Statistical Science: A Review Journal of the Institute of Mathematical Statistics, 29(1), 58-68. https://doi. org /10.1214/13-STS419

Rafter y, A . E., Li, N., Ševčíková, H., Gerland, P., & Heilig, G. K . (2012). Bayesian probabilistic population projections for all countries. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109(35), 13915-21. https://doi.org /10.1073/pnas.1211452109

United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance .(2017) .tables, ES A /P/ WP/2

[32←]

I should remember not to be too caustic with my parents, though, because it seems that‘ perceived time really does run more quickly the older we get, fuelling our ’.increasing feelings of overburdened time-poverty

Block , R . A ., Zakay, D., & Hancock , P. A . (1999). Developmental changes in human duration judgments: a meta-analytic review. Developmental Review, 19(1), https://doi.org /10.1006/ DREV.1998.0475 .183-211

[33←]

On average the younger group clocked an almost-perfect three minutes and three‘ seconds of real time, but the older group didn’t call a halt until a staggering three ’.minutes and 40 seconds, on average

Mangan, P., Bolinskey, P., & Rutherford, A . (1997). Underestimation of time during aging: the result of age-related dopaminergic changes. In Annual Meeting of the .Society for Neuroscience

[34←]

In other related experiments, participants were asked to estimate the length of a fixed‘ period of time during which they had been undertaking a task . Older participants consistently gave shorter estimates for the length the time period they had ’.experienced than younger groups

Craik , F. I. M., & Hay, J. F. (1999). Aging and judgments of duration: Effects of task complexity and method of estimation. Perception & Psychophysics, 61(3), 549-https://doi.org /10.3758/BF03211972 .60

[35←]

One theor y is related to the fact that our metabolism slows as we get older, matching‘ ’.the slowing of our heartbeats and our breathing

Church, R . M. (1984). Properties of the Internal Clock . Annals of the New York Academy of Sciences, 423(1), 566-82. https://doi. org /10.1111/j.1749-tb23459.x.6632.1984

Craik , F. I. M., & Hay, J. F. (1999). Aging and judgments of duration: effects of task complexity and method of estimation. Perception & Psychophysics, 61(3), 549-https://doi.org /10.3758/BF03211972 .60

Gibbon, J., Church, R . M., & Meck , W. H. (1984). Scalar timing in memor y. Annals of the New York Academy of Sciences, 423(1 Timing and Ti), 52-77. https://doi.org /10.1111/j.1749-6632.1984.tb23417.x

[36←]

A competing theor y suggests that our perception of time’s passage depends upon the‘ ’.amount of new perceptual information we are subjected to from our environment

Pennisi, E. (2001). The human genome. Science, 291(5507), 1177-80. https://doi.org SCIENCE.291.5507.1177/10.1126/

[37←]

Experiments on subjects experiencing the unfamiliar sensation of free fall have‘ ’.demonstrated this to be the case

Stetson, C., Fiesta, M. P., & Eagleman, D. M. (2007). Does time really slow down during a frightening event? PLoS ONE, 2(12), e1295. https://doi. org journal.pone.0001295/10.1371/

[38←]

I tried to replicate the late onset Alzheimer’s risks in my genetic report using the same‘ method as 23andMe and data taken directly from the report or from papers they ’.cited

Farrer, L. A ., Cupples, L. A ., Haines, J. L., Hyman, B., Kukull, W. A ., Mayeux , R Duijn, C. M. van. (1997). Effects of age, sex , and ethnicity on the association . . . ,. between apolipoprotein E genotype and Alzheimer disease. JAMA, 278(16), 1349. https://doi.org /10.1001/jama.1997.03550160069041

Gaugler, J., James, B., Johnson, T., Scholz, K ., & Weuve, J. (2016). 2016 Alzheimer’s disease facts and figures. Alzheimer’s & Dementia, 12(4), 459-509. https://doi.org /10.1016/J.JALZ.2016.03.001

Genin, E., Hannequin, D., Wallon, D., Sleegers, K ., Hiltunen, M., Combarros, O., . Campion, D. (2011). APOE and Alzheimer disease: a major gene with semi- . . dominant inheritance. Molecular Psychiatry, 16(9), 903-7. https://doi.org mp.2011.52/10.1038/

.Jewell, N. P. (2004). Statistics for Epidemiology. Chapman & Hall/CRC

Macpherson, M., Naughton, B., Hsu, A . and Mountain, J. (2007). Estimating .Genotype-Specific Incidence for One or Several Loci, 23andMe

Risch, N. (1990). Linkage strategies for genetically complex traits. I. Multilocus .models. American Journal of Human Genetics, 46(2), 222-8

[39←]

My conclusion was reinforced when I came across the findings of a 2014 study which‘ investigated the risk-calculation methods of three of the leading personal genomic ’.companies, including 23andMe

Kalf, R . R . J., Mihaescu, R ., Kundu, S., de Knijff, P., Green, R . C., & Janssens, A C. J. W. (2014). Variations in predicted risks in personal genome testing for . common complex diseases. Genetics in Medicine, 16(1), 85-91. https://doi.org gim.2013.80/10.1038/

[40←]

In fact, BMI was first cooked up in 1835 by Belgian Adolphe Quetelet, a renowned‘ astronomer, statistician, sociologist and mathematician but, notably, not a ’.physician

Quetelet, L. A . J. (1994). A treatise on man and the development of his faculties. Obesity Research, 2(1), 72-85. https://doi.org /10.1002/ j.1550-8528.1994.tb00047.x

[41←]

In response to unprecedented levels of obesity, American physiologist Ancel Keys‘ who would later make the link between saturated fat and cardiovascular disease)) ’.undertook a study to find the best indicator of excess weight

Keys, A ., Fidanza, F., Karvonen, M. J., Kimura, N., & Taylor, H. L. (1972). Indices of relative weight and obesity. Journal of Chronic Diseases, 25(6-7), 329-43. https://doi.org /10.1016/0021-9681(72)90027-6

[42←]

If the definition of obesity were instead based on high percentage body fat, between 15‘ ’.and 35% of men with non-obese BMIs would be reclassified as obese

Tomiyama, A . J., Hunger, J. M., Nguyen-Cuu, J., & Wells, C. (2016). Misclassification of cardiometabolic health when using body mass index categories in NHANES 2005-2012. International Journal of Obesity, 40(5), 883-6. https://doi.org /10.1038/ijo.2016.17

[43←]

Maybe it’s more worr ying when you find out that, in milk , Strep f. cells can divide to‘ produce two daughter cells ever y hour’ Cárdenas, A . M., Andreacchio, K . A ., & Edelstein, P. H. (2014). Prevalence and detection of mixed-population enterococcal bacteremia. Journal of Clinical Microbiology, 52(7), 2604–8. https://doi.org JCM.00802-14 /10.1128/

Lam, M. M. C., Seemann, T., Tobias, N. J., Chen, H., Haring, V., Moore, R . J., . . . Stinear, T. P. (2013). Comparative analysis of the complete genome of an epidemic

hospital sequence type 203 clone of vancomycin- resistant Enterococcus faecium. BMC Genomics, 14, 595. https://doi. org /10.1186/1471-2164-14-595

[44←]

These incorrect classifications have implications for the way in which we measure and' record obesity at a population level. Perhaps more worr yingly though, diagnosing healthy individuals as overweight or obese based on their BMI can also have '.detrimental effects on their mental health

McCrea, R . L., Berger, Y. G., & King, M. B. (2012). Body mass index and common mental disorders: exploring the shape of the association and its moderation by age, gender and education. International Journal of Obesity, 36(3), 414-21. https://doi.org /10.1038/ijo.2011.65

[45←]

'.However, approximately 85% of automated warnings in ICUs)are false alarms'

Sendelbach, S., & Funk , M. (2013). Alarm fatigue: a patient safety concern. A ACN Advanced Critical Care, 24(4), 378-86; quiz 387-8. https:// doi.org NCI.0b013e3182a903f9/10.1097/

Lawless, S. T. (1994). Cr ying wolf: false alarms in a pediatric intensive care unit. .Critical Care Medicine, 22(6), 981-85

[46←]

For the same reason, median filtering is beginning to be used in our ICU monitors to' '.prevent false alarms

Mäkivirta, A ., Koski, E., Kari, A ., & Sukuvaara, T. (1991). The median filter as a preprocessor for a patient monitor limit alarm system in intensive care. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 34(2-3), 139-44. https://doi.org V-90039(91)10.1016/0169-2607/

[47←]

Median filtering can reduce the occurrence of false alarms in ICU monitors by as much' as 60% without jeopardising patient safety.' Imhoff, M., Kuhls, S., Gather, U., & Fried, R . (2009). Smart alarms from medical devices in the OR and ICU. Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology, 23(1), 39-50. https://doi.org J.BPA .2008.07.008/10.1016/

[48←]

Indeed, for people who have breast cancer, the test will pick this up roughly nine times‘ out of ten. For people who don’t have the disease, the results of the test will tell you ’.this correctly nine out of ten times

Hofvind, S., Geller, B. M., Skelly, J., & Vacek , P. M. (2012). Sensitivity and specificity of mammographic screening as practised in Vermont and Norway. The British Journal of Radiology, 85(1020), e1226-32. https://doi. org bjr/15168178/10.1259/

[49←]

In 2007, a group of 160 gynaecologists were given the following information about the‘ ’accuracy of mammograms and the prevalence of breast cancer in the population

Gigerenzer, G., Gaissmaier, W., Kurz-Milcke, E., Schwartz, L. M., & Woloshin, S. Helping doctors and patients make sense of health statistics. Psychological .(2007) Science in the Public Interest, 8(2), 53-96. https://doi. org /10.1111/j.1539-x.6053.2008.00033

[50←]

Writing in the British Medical Journal, Muir Gray, former director of the UK National‘ ’Screening Programme, admitted

Gray, J. A . M., Patnick , J., & Blanks, R . G. (2008). Maximising benefit and minimising harm of screening. BMJ (Clinical Research Ed.), 336(7642), 480-83. https://doi.org /10.1136/bmj.39470.643218.94

[51←]

In 2006, 1000 adults in Germany were asked whether a series of tests gave results that‘ ’.were 100% certain

Gigerenzer, G., Gaissmaier, W., Kurz-Milcke, E., Schwartz, L. M., & Woloshin, S. Helping doctors and patients make sense of health statistics. Psychological .(2007) Science in the Public Interest, 8(2), 53-96. https://doi. org /10.1111/j.1539-x.6053.2008.00033

[52←]

However, at the time he took the test, ELISA had reported false positive rates of‘ ’.around 0.3%

Cornett, J. K ., & Kirn, T. J. (2013). Laborator y diagnosis of HIV in adults: a review of current methods. Clinical Infectious Diseases, 57(5), 712-18. https://doi.org /10.1093/cid/cit281

[53←]

’archaeopter yx was 150 million years old‘

Starr, C., Taggart, R ., Evers, C. A ., & Starr, L. (2019). Biology: The Unity and .Diversity of Life, Cengage Learning

[54←]

’archaeopter yx was 150 million years old‘

Starr, C., Taggart, R ., Evers, C. A ., & Starr, L. (2019). Biology: The Unity and .Diversity of Life, Cengage Learning

[55←]

In December 2016, a global team of researchers developed a blood test for Creutzfeldt-‘ ’.(Jakob disease (CJD

Bougard, D., Brandel, J.-P., Bélondrade, M., Béringue, V., Segarra, C., Fleur y, H., . Coste, J. (2016). Detection of prions in the plasma of presymptomatic and . . symptomatic patients with variant Creutzfeldt-Jakob disease. Science Translational Medicine, 8(370), 370ra182. https://doi. org /10.1126/scitranslmed.aag1257

[56←]

In one case, a woman miscarried after she was sanctioned to undergo a surgical‘ 83 procedure that would never have been undertaken had she known she was ’.pregnant

Sigel, C. S., & Grenache, D. G. (2007). Detection of unexpected isoforms of human chorionic gonadotropin by qualitative tests. Clinical Chemistry, 53(5), 989-90. https://doi.org /10.1373/clinchem.2007.085399

[57←]

Another woman’s ectopic pregnancy was missed by urine tests, leading to a ruptured‘ ’.fallopian tube and life-threatening blood loss

Daniilidis, A ., Pantelis, A ., Makris, V., Balaouras, D., & Vrachnis, N. (2014). A unique case of ruptured ectopic pregnancy in a patient with negative pregnancy test .a case report and brief review of the literature. Hippokratia, 18(3), 282-84 -

[58←]

Bertillon suggested that the similarities were not coincidences, but ‘must have been‘ done carefully on purpose, and must denote a purposeful intention, probably a secret ’."code

Schneps, L., & Colmez, C. (2013). Math on trial : how numbers get used and abused .(in the courtroom, Basic Books (New York

[59←]

By exposing Bertillon's miscalculation and arguing that even attempting to apply' probability theor y to such a question was not legitimate, Poincaré was able to '.debunk the aberrant handwriting analysis and in so doing to exonerate Dreyfus

Jean Mawhin. (2005). Henri Poincaré. A life in the service of science. Notices of the .American Mathematical Society, 52(9), 1036-44

[60←]

The Japanese criminal justice system, for example, has a conviction rate of 99.9%,' '.with most of these convictions backed up with a confession

Ramseyer, J. M., & Rasmusen, E. B. (2001). Why is the Japanese conviction rate so high? The Journal of Legal Studies, 30(1), 53-88. https:// doi.org /10.1086/468111

[61←]

In 1989, Meadow, at the time an eminent British paediatrician, had edited a book ,' ABC of Child Abuse, in which was contained the aphorism that came to be known as Meadow 's law: 'One sudden infant death is a tragedy, two is suspicious and '.'three is murder until proved otherwise

Meadow, R . (Ed.) (1989). ABC of Child Abuse (First edition). British Medical .Journal Publishing Group

[62←]

'The prevalence of autism in the UK is roughly 1 per 100'

Brugha, T., Cooper, S., McManus, S., Purdon, S., Smith, J., Scott, F.,... Tyrer, F. Estimating the Prevalence of Autism Spectrum Conditions in Adults - .(2012) .Extending the 2007 Adult Psychiatric Morbidity Survey - NHS Digital

[63←]

'Only one in five of those on the autistic spectrum are female'

Ehlers, S., & Gillberg, C. (1993). The Epidemiology of Asperger Syndrome. Journal of Child Psychology and Psychiatry, 34(8), 1327-50. https://doi.org /10.1111/j.1469-tb02094.x.7610.1993

[64←]

For his figures, Meadow used a - then unpublished - report on SIDS for which he had‘ ’.been asked to write the preface

Fleming, P. J., Blair, P. S. P., Bacon, C., & Berr y, P. J. (2000). Sudden unexpected .deaths in infancy: the CESDI SUDI studies 1993-1996. The Stationer y Office

Leach, C. E. A ., Blair, P. S., Fleming, P. J., Smith, I. J., Platt, M. W., Berr y, P. J., . . Group, the C. S. R . (1999). Epidemiology of SIDS and explained sudden infant . .deaths. Pediatrics, 104(4), e43

[65←]

In 2001, researchers at the University of Manchester also identified markers in genes‘ related to the regulation of the immune system which put children at increased risk ’.of SIDS

Summers, A . M., Summers, C. W., Drucker, D. B., Hajeer, A . H., Barson, A ., & Hutchinson, I. V. (2000). Association of IL-10 genotype with sudden infant death syndrome. Human Immunology, 61(12), 1270-73. https://doi. org /10.1016/S0198-X-00183(00)8859

[66←]

Many more genetic risk factors have since been identified.’ Brownstein, C. A ., Poduri,‘ .(A ., Goldstein, R . D., & Holm, I. A . (2018

The genetics of Sudden Infant Death Syndrome. In SIDS: Sudden Infant and Early .Childhood Death: The Past, the Present and the Future

Dashash, M., Pravica, V., Hutchinson, I. V., Barson, A . J., & Drucker, D. B. (2006). Association of Sudden Infant Death Syndrome with VEGF and IL-6 Gene polymorphisms. Human Immunology, 67(8), 627-33. https://doi. org J.HUMIMM.2006.05.002/10.1016/

[67←]

’ measuring the health of the economy‘

Ma, Y. Z. (2015). Simpson’s paradox in GDP and per capita GDP growths. Empirical Economics, 49(4), 1301-15. https://doi.org /10.1007/ s00181-015-0921-3

[68←]

’understanding voter profiles‘

Nurmi, H. (1998). Voting paradoxes and referenda. Social Choice and Welfare, https://doi.org /10.1007/s003550050109 .333-50 ,(3)15

[69←]

’drug development‘

Abramson, N. S., Kelsey, S. F., Safar, P., & Sutton-Tyrrell, K . (1992). Simpson’s paradox and clinical trials: What you find is not necessarily what you prove. Annals of Emergency Medicine, 21(12), 1480-82. https://doi. org /10.1016/S0196-80066-6(05)0644

[70←]

Low birth-weight had long been associated with higher infant mortality, but it seemed‘ that smoking during pregnancy was providing some protection to low birth-weight ’.babies

Yerushalmy, J. (1971). The relationship of parents’ cigarette smoking to outcome of pregnancy - implications as to the problem of inferring causation from observed associations. American Journal of Epidemiology, 93(6), 443-56. https://doi.org oxfordjournals. aje.a121278/10.1093/

[71←]

’.In reality, it was nothing of the sort‘

Wilcox , A . J. (2001). On the importance - and the unimportance - of birthweight. International Journal of Epidemiology, 30(6), 1233-41. https:// doi.org ije/30.6.1233/10.1093/

[72←]

Double infant murder has been calculated to be between ten and 100 times less‘ ’.frequent than double SIDS death

Dawid, A . P. (2005). Bayes’s theorem and weighing evidence by juries. In Richard Swinburne (ed.), Bayes’s Theorem. British Academy. https://doi. org bacad/9780197263419.003.0004/10.5871/

Hill, R . (2004). Multiple sudden infant deaths - coincidence or beyond coincidence? Paediatric and Perinatal Epidemiology, 18(5), 320-26. https:// doi.org j.1365-3016.2004.00560.x/10.1111/

[73←]

But Leila Schneps and Coralie Colmez, authors of the 2013‘

book , Math on Trial: How Numbers Get Used and Abused in the Courtroom, suggest that Judge Hellmann was wrong, sometimes two unreliable tests are better ’.than one

Schneps, L., & Colmez, C. (2013). Math on Trial: How Numbers Get Used and .Abused in the Courtroom

[74←]

the use of cranberries to treat urinar y tract infections’ Jepson, R . G., Williams, G., &‘ Craig, J. C. (2012). Cranberries for preventing urinar y tract infections. Cochrane Database of Systematic Reviews, (10). https://doi.org CD001321.pub5.10.1002/14651858/

[75←]

’.the use of vitamin C for preventing the common cold‘

Hemilä, H., Chalker, E., & Douglas, B. (2007). Vitamin C for preventing and treating the common cold. Cochrane Database of Systematic Reviews, (3). https://doi.org /10.1002/14651858.CD000980.pub3

[76←]

Truthfulness and accuracy are near the top (if not the top) of the list on almost all codes‘ ’.of journalistic ethics and integrity

American Society of News Editors. (2019). ASNE Statement of Principles. Retrieved March 16, 2019, from https://www.asne.org /content. asp?pl=24&sl=171&contentid=171

International Federation of Journalists. (2019). Principles on Conduct of Journalism IFJ. Retrieved March 16, 2019, from https://www.ifj.org / who/rules-and- -policy/principles-on-conduct-of-journalism.html

Associated Press Media Editors. (2019). Statement of Ethical Principles - APME. Retrieved March 16, 2019, from https://www.apme.com/page/Ethi csStatement?hhsearchterms=%22ethics%22&

Society of Professional Journalists. (2019). SPJ Code of Ethics. Retrieved March from https://www.spj.org /ethicscode.asp ,2019 ,16

[77←]

’ Based on this study‘

Troyer, K ., Gilboy, T., & Koeneman, B. (2001). A nine STR locus match between two apparently unrelated individuals using AmpFlSTR® Profiler Plus and Cofiler. In Genetic Identity Conference Proceedings, 12th International Symposium on Human Identification. Retrieved from https://

www.promega.ee/~/media/files/resources/conference proceedings/ishi 12/ poster abstracts/troyer.pdf

[78←]

If 122 matches had turned up in a database as small as 65,000 people, could DNA‘ really be relied upon to uniquely identify suspects in a countr y with a population of ’?million 300

Curran, J. (2010). Are DNA profiles as rare as we think? Or can we trust DNA statistics? Significance, 7(2), 62-6. https://doi.org /10.1111/j.1740-x.9713.2010.00420

[79←]

In 2014, the Federal Trade Commission (FTC) wrote to L’Oréal charging them with‘ ’.deceptive advertising over the Génifique range

Ramirez, E., Brill, J., Ohlhausen, M. K ., Wright, J. D., Terrell, M., & Clark , D. S. In the matter of L’Oréal USA , Inc., a corporation. Docket No. C. Retrieved .(2014) from https://www.ftc.gov/system/files/documents/ cases/140627lorealcmpt.pdf

[80←]

Four years earlier, in 1932, they had predicted Roosevelt’s victor y margin to within a‘ ’.percentage point

Squire, P. (1988). Why the 1936 Literary Digest poll failed. Public Opinion Quarterly, 52(1), 125. https://doi.org /10.1086/269085

[81←]

In August, they sent out straw polls to ever yone they had identified, and trumpeted in‘ the magazine’ Simon, J. L. (2003). The Art of Empirical Investigation. Transaction .Publishers

[82←]

’the number of war dead in Kosovo‘

Spagat, M. (2012). Estimating the Human Costs of War: The Sample Survey Approach. Oxford University Press. https://doi.org /10.1093/ oxfordhb/9780195392777.013.0014

[83←]

‘The Digest were ready to announce their result. "Landon, 1,293,669; Roosevelt, 972,897" was the headline of the article.’

‘Literar y Digest. (1936). Landon, 1,293,669; Roosevelt, 972,897: Final Returns in ‘The Digest’s’ Poll of Ten Million Voters. Literary Digest, 122, 5-6.

[84←]

‘That same year, using just 4,500 participants, Fortune magazine was able to predict the margin of Roosevelt’s victor y to within 1%.’

Cantril, H. (1937). How accurate were the polls? Public Opinion Quarterly, 1(1), 97. https://doi.org /10.1086/265040

Lusinchi, D. (2012). ‘President’ Landon and the 1936 Literary Digest poll. Social Science History, 36(01), 23-54. https://doi.org /10.1017/ S014555320001035X

[85←]

‘The dent that their previously impeccable credibility sustained on the back of the results is cited as a significant factor in hastening the magazine’s demise less than two years later.’

Squire, P. (1988). Why the 1936 Literary Digest poll failed. Public Opinion Quarterly, 52(1), 125. https://doi.org /10.1086/269085

[86←]

‘A mathematically oriented blog-post’

‘Rod Liddle said, "Do the math". So I did.’ Blog post from polarizingthevacuum, 8 September 2016. Retrieved 21 March, 2019, from https://polarizingthevacuum.wordpress.com/2016/09/08/rod-liddle-said- do-the-math-so-i-did/#comments

[87←]

‘the other isotope, which makes up 99.3% of naturally occurring uranium’

Webb, J. (2003). Are the laws of nature changing with time? Physics World, 16(4), 33-8. https://doi.org /10.1088/2058-7058/16/4/38

[88←]

‘According to FBI statistics’

Federal Bureau of Investigation. (2015). Crime in the United States: FBI — Expanded Homicide Data Table 6. Retrieved from https://ucr.fbi.gov/ crime-in-the-

u.s/2015/crime-in-the-u.s.-2015/tables/expanded_homicide_
data_table_6_murder_race_and_sex_of_vicitm_by_race_and_sex_of_
offender_2015.xls

[89←]

Given that black people comprised just 12.6% of the US population in 2015 and white‘ people 73.3%, it is alarming that black individuals make up 45.6% of the homicide '.victims

U.S. Census Bureau. (2015). American FactFinder - Results. Retrieved from https://factfinder.census.gov/bkmk /table/1.0/en/ACS/15_5Y R / DP05/0100000US

[90←]

The FBI was found to be recording fewer than half of all killings by police in the US.’‘
Swaine, J., Laughland, O., Lartey, J., & McCarthy, C. (2016). The counted: people killed by police in the US. Retrieved from https://www. theguardian.com/us-news/series/counted-us-police-killings

[91←]

So successful was the project, that in October 2015, the then FBI-director, James‘ Comey, called it "embarrassing and ridiculous" that the Guardian had better data on '.civilian deaths at the hands of the police than the FBI

Tran, M. (2015, October 8). FBI chief: ‘unacceptable’ that Guardian has better data on police violence. The Guardian. Retrieved from https://www. theguardian.com/us-news/2015/oct/08/fbi-chief-says-ridiculous-guardian- washington-post-better-information-police-shootings

[92←]

only 635,781 full-time "law enforcement officers" (those who carr y a firearm and a‘ '(badge

Federal Bureau of Investigation. (2015). Crime in the United States: Full-time Law Enforcement Employees. Retrieved from https://ucr.fbi.gov/ crime-in-the-u.s/2015/crime-in-the-u.s.-2015/tables/table-74

[93←]

In particular, it does an excellent job of describing the rate at which the levels of‘ '.radiation emitted by a radioactive substance decrease over time

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). L XIV. The cause and nature of radioactivity. Part II. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(23), 569-85. https://doi.org /10.1080/14786440209462881

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). XLI. The cause and nature of radioactivity. Part I. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(21), 370-96. https://doi.org /10.1080/14786440209462856

[94←]

In particular, it does an excellent job of describing the rate at which the levels of‘ ’.radiation emitted by a radioactive substance decrease over time

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). L XIV. The cause and nature of radioactivity. Part II. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(23), 569-85. https://doi.org /10.1080/14786440209462881

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). XLI. The cause and nature of radioactivity. Part I. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(21), 370-96. https://doi.org /10.1080/14786440209462856

[95←]

Liddle’s piece wasn’t the first or the last time that the Sun newspaper was to be‘ embroiled in statistical controversy. In 2009, under the, admittedly inspired headline Careless pork costs lives", the Sun reported"

just one of many hundreds of results from a 500-page study by the World Cancer ’.Research Fund, on the effect of consuming 50 grams of processed meat per day

World Cancer Research Fund, & American Institute for Cancer Research. (2007). Second Expert Report | World Cancer Research Fund International. http://discover y.ucl.ac.uk /4841/1/4841.pdf

[96←]

In particular, it does an excellent job of describing the rate at which the levels of‘ ’.radiation emitted by a radioactive substance decrease over time

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). L XIV. The cause and nature of radioactivity. Part II. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(23), 569-85. https://doi.org /10.1080/14786440209462881

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). XLI. The cause and nature of radioactivity. Part I. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(21), 370-96. https://doi.org /10.1080/14786440209462856

[97←]

‘The figures actually reported in the journal Nature Genetics were that 10% of individuals possessed genetic variants which left them at a 15% lower risk than the 90% of the population with a different variant.’

Newton-Cheh, C., Larson, M. G., Vasan, R . S., Levy, D., Bloch, K . D., Surti, A .,... Wang, T. J. (2009). Association of common variants in NPPA and NPPB with circulating natriuretic peptides and blood pressure. Nature Genetics, 41(3), 348-53. https://doi.org /10.1038/ng.328

[98←]

‘In one study from 2010, participants were presented with a number of numerical statements about medical procedures and asked to rank the risk they associated with each on a scale from one (not risky at all) to four (ver y risky).’

Garcia-Retamero, R ., & Galesic, M. (2010). How to reduce the effect of framing on messages about health. Journal of General Internal Medicine, 25(12), 1323-29. https://doi.org /10.1007/s11606-010-1484-9

[99←]

‘archaeopter yx was 150 million years old’

Starr, C., Taggart, R ., Evers, C. A ., & Starr, L. (2019). Biology: The Unity and Diversity of Life, Cengage Learning.

[100←]

‘determining the age of ancient artefacts like the Dead Sea scrolls’ Bonani, G., Ivy, S., Wölfli, W., Broshi, M., Carmi, I., & Strugnell, J. (1992). Radiocarbon dating of Fourteen Dead Sea Scrolls. Radiocarbon, 34(03), 843-9. https://doi.org /10.1017/S0033822200064158

Carmi, I. (2000). Radiocarbon dating of the Dead Sea Scrolls. In L. Schiffman, E. Tov, & J. VanderKam (eds.), The Dead Sea Scrolls: Fifty Years After Their Discovery. 1947-1997 (p. 881).

Bonani, G., Broshi, M., & Carmi, I. (1991). 14 Radiocarbon dating of the Dead Sea scrolls. ’Atiqot, Israel Antiquities Authority.

[101←]

‘This practice is known as "mismatched framing" and was found to occur in roughly a third of journal articles reporting the harms and benefits of medical treatments in three of the world’s leading medical journals.’

Sedrakyan, A ., & Shih, C. (2007). Improving depiction of benefits and harms. Medical Care, 45(10 Suppl 2), S23-S28. https://doi.org /10.1097/ MLR 0b013e3180642f69.

[102←]

Along with many other studies, the online app reported the results of a recent clinical‘ trial, on over 13,000 women at increased risk of breast cancer, in which the benefits ’.and potential side effects of the drug Tamoxifen were assessed

Fisher, B., Costantino, J. P., Wickerham, D. L., Redmond, C. K ., Kavanah, M., Cronin, W. M., . . . Wolmark , N. (1998). Tamoxifen for prevention of breast cancer: report of the National Surgical Adjuvant Breast and Bowel Project P-1 Study. JNCI: Journal of the National Cancer Institute, 90(18), 1371-88. https://doi.org jnci/90.18.1371/10.1093/

[103←]

Using percentages instead of decimals to highlight perceived benefits is one of another‘ ’."family of tricks referred to as "ratio bias

Passerini, G. and Macchi, L. and Bagassi, M. (2012). A methodological approach to .(ratio bias. Judgment and Decision Making, 7(5

[104←]

Our susceptibility to ratio bias has been confirmed in simple experiments in which‘ ’.blindfolded subjects are asked to choose a jelly bean from a tray at random

Denes-Raj, V., & Epstein, S. (1994). Conflict between intuitive and rational processing: When people behave against their better judgment. Journal of Personality and Social Psychology, 66(5), 819-29. https://doi. org /10.1037/0022-3514.66.5.819

[105←]

In one study conducted in 1987, 25 test-anxious US students, who had performed‘ unexpectedly poorly on the multiple choice Scholastic Aptitude Test (SAT), were ’.given the hypertension drug propranolol and retested

Faigel, H. C. (1991). The effect of beta blockade on stress-induced cognitive dysfunction in adolescents. Clinical Pediatrics, 30(7), 441-5. https://doi.org 10.1177/000992289103000706/

[106←]

These types of trial are often considered unethical, but enough studies have been done‘ in the past to indicate that the majority of the so- called placebo effect is actually a ’.result of regression to the mean - from which patients derive no benefit

Hróbjartsson, A ., & Gøtzsche, P. C. (2010). Placebo interventions for all clinical conditions. Cochrane Database of Systematic Reviews, (1). https:// doi.org CD003974.pub3.10.1002/14651858/

[107←]

The first studies comparing crime rates pre-introduction of the laws to those post-‘ introduction seemed to indicate that rates of murder and violent crime had reduced ’.in the immediate aftermath of the issuing of these concealed-carr y laws

Lott, J. R . (2000). More Guns, Less Crime: Understanding Crime and Gun Control .Laws (2nd edn). University of Chicago Press

Lott, Jr., J. R ., & Mustard, D. B. (1997). Crime, deterrence, and right to carr y concealed handguns. The Journal of Legal Studies, 26(1), 1-68. https:// doi.org 10.1086/467988/

Plassmann, F., & Tideman, T. N. (2001). Does the right to carr y concealed handguns deter countable crimes? Only a count analysis can say. The Journal of Law and Economics, 44(S2), 771-98. https://doi. org /10.1086/323311

Bartley, W. A ., & Cohen, M. A . (1998). The effect of concealed weapons laws: an extreme bound analysis. Economic Inquiry, 36(2), 258-65. https:// doi.org j.1465-7295.1998.tb01711.x/10.1111/

Moody, C. E. (2001). Testing for the effects of concealed weapons laws: specification errors and robustness. The Journal of Law and Economics, 44(S2), https://doi.org /10.1086/323313 .799-813

[108←]

Between 1990 and 2001 increases in policing, rising numbers of incarcerations and the‘ receding crack cocaine epidemic all contributed to a fall in murders across the US ’.from around ten per 100,000 per year to around six per 100,000 per year

Levitt, S. D. (2004). Understanding why crime fell in the 1990s: four factors that explain the decline and six that do not. Journal of Economic Perspectives, 18(1), https://doi.org /10.1257/089533004773563485 .163-90

[109←]

Perhaps even more important is one study ’s finding that once regression to the mean‘ was accounted for, the data ". . . gives no support to the hypothesis that shall-issue ’."laws have beneficial effects in reducing murder rates

Grambsch, P. (2008). Regression to the mean, murder rates, and shall-issue laws. The American Statistician, 62(4), 289-95. https://doi. org 10.1198/000313008X362446/

[110←]

For example, a simple rounding error in a German election in 1992 nearly led to the‘ leader of the victorious Social Democrat Party being denied a seat in the parliament, ’.when the Green Party ’s share of the vote was reported as 5.0% instead of 4.97%

Weber-Wulff, D. (1992). Rounding error changes parliament makeup. The Risks .(Digest, 13(37

[111←]

In a completely different context, in 1982, a newly created Vancouver Stock Exchange‘ index plummeted continuously over a period of nearly two years, despite the ’.market’s bullish performance

McCullough, B. D., & Vinod, H. D. (1999). The numerical reliability of econometric software. Journal of Economic Literature, 37(2), 633-65. https://doi.org jel.37.2.633/10.1257/

[112←]

But, while the US remains the last industrial nation to use imperial units’ Technically,‘ United States customar y units are slightly different to their close relatives of the British imperial system. The differences, however, are not important for the .’purposes of this book , so we will refer to both measurement systems as ‘imperial

[113←]

’.The missile alert was assumed to be a false alarm and removed from the system‘

Wolpe, H. (1992). Patriot missile defense: software problem led to system failure at Dhahran, Saudi Arabia, United States General Accounting Office, Washington D.C. .Retrieved from https://www.gao.gov/products/ IMTEC-92-26

[114←]

In 2000, the Clay Mathematics Institute announced a list of seven "Millennium Prize‘ Problems", considered to be the most important unresolved problems in

mathematics’ Jaffe, A . M. (2006). The millennium grand challenge in mathematics. .Notices of the AMS 53.6

[115←]

In 2002 and 2003 reclusive Russian mathematician Gregori‘

’.Perelman shared three dense mathematical papers with the topology community

Perelman, G. (2002). The entropy formula for the Ricci flow and its geometric applications. Retrieved from http://arxiv.org /abs/math/0211159

Perelman, G. (2003). Finite extinction time for the solutions to the Ricci flow on certain three-manifolds. Retrieved from http://arxiv.org /abs/ math/0307245

Perelman, G. (2003). Ricci flow with surger y on three-manifolds. Retrieved from http://arxiv.org /abs/math/0303109

[116←]

If you’re planning a similar odyssey for yourself, or even just a local pub crawl, it’s‘ ’.probably worth consulting Cook’s algorithm first

Cook , W. (2012). In Pursuit of the Traveling Salesman: Mathematics at the Limits .of Computation. Princeton University Press

[117←]

Fortunately for ever yone who uses a sat nav, it turns out that there is an efficient‘ method - Dijkstra’s algorithm - which finds the solution to the "shortest path ’.problem" in polynomial time

Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. .Numerische Mathematik, 1(1), 269-71

[118←]

More precisely you should reject the fraction 1/e of the available options, where e is a‘ ’.mathematical shorthand for a number known as Euler’s number

Euler’s number first appeared in the 17th centur y, when Swiss mathematician Jacob Bernoulli (uncle of the early mathematical biologist, Daniel Bernoulli, whose epidemiological exploits are relayed in Chapter 7) was investigating compound interest. In Chapter 1 we encountered compound interest, which means that interest is paid into the account so that it can accrue interest itself. Bernoulli wanted to know how the amount of interest accrued at the end of a year depends on how often the .interest is compounded

Imagine, for simplicity, that the bank pays a special rate of 100% a year on an initial investment of £1. Interest is added to the account at the end of each fixed period and interest can then be paid on that interest in the next period. What happens if the bank decides to pay interest only once a year? At the end of the year, we receive £1 in interest, but there is no time left to accrue further interest on the interest, so we are left with £2. Alternatively, if the bank decides to pay us ever y six months, then after half a year the bank calculates the interest owed using half the yearly rate (i.e. leaving us with £1.50 in the account. The same procedure is repeated at the (50% end of the year, giving 50% interest on the £1.50 in the account, and leaving a total .of £2.25 at the end of the year

By compounding more often, the money in the account by the end of the year increases. Compounding quarterly, for example, gives £2.44, monthly compounding yields £2.61. Bernoulli was able to show that by using continuous compounding i.e. calculating and accruing interest infinitely often, but with an infinitely small) rate), the amount of money at year-end would peak at approximately £2.72. To be more precise, we would have precisely e (Euler’s number) pounds at the end of the .year

[119←]

In fact, the problem first came to the attention of mathematicians as the "hiring‘ ’."problem

Ferguson, T. S. (1989). Who solved the secretar y problem? Statistical Science, 4(3), https://doi.org /10.1214/ss/1177012493 .282-89

Gilbert, J. P., & Mosteller, F. (1966). Recognizing the maximum of a sequence. Journal of the American Statistical A ssociation, 61(313), 35. https://doi.org 10.2307/2283044/

[120←]

In the year 2000, measles was officially declared eliminated across the whole of the‘ ’.United States

Fiebelkorn, A . P., Redd, S. B., Gastañaduy, P. A ., Clemmons, N., Rota, P. A ., Rota, J. S., . . . Wallace, G. S. (2017). A comparison of postelimination measles epidemiology in the United States, 2009-2014 versus 2001-2008. Journal of the Pediatric Infectious Diseases Society, 6(1), 40-48. https://doi. org jpids/piv080/10.1093/

[121←]

To investigate his hypothesis, in 1796, Jenner carried out a pioneering experiment into‘
’.disease prevention that would be considered wildly unethical today

Jenner, E. (1798). An inquiry into the causes and effects of the variolae vaccinae, a disease discovered in some of the western counties of England, particularly .(Gloucestershire, and known by the name of the cow pox. (Ed. S. Low

[122←]

’.This method was not supplanted by a less invasive alternative for over 170 years‘

Booth, J. (1977). A short histor y of blood pressure measurement. Proceedings of .the Royal Society of Medicine, 70(11), 793-9

[123←]

Bernoulli suggested an equation to describe the proportion of people of a given age‘
’.who had never had smallpox , and were hence still susceptible to the disease

Bernoulli, D., & Blower, S. (2004). An attempt at a new analysis of the mortality caused by smallpox and of the advantages of inoculation to prevent it. Reviews in Medical Virology, 14(5), 275-88. https://doi. org /10.1002/rmv.443

[124←]

At the end of the 19th centur y, poor sanitation and crowded living environments in‘
colonial India led to a series of deadly epidemics including cholera, leprosy and
’.malaria sweeping through the countr y and killing millions

Hays, J. N. (2005). Epidemics and Pandemics: Their Impacts on Human History. .ABC-CLIO

Watts, S. (1999). British development policies and malaria in India

c.1929. Past & Present, 165(1), 141-81. https://doi.org /10.1093/past/165.1.141-1897

Harrison, M. (1998). ‘Hot beds of disease’: malaria and civilization in nineteenth-centur y British India. Parassitologia, 40(1-2), 11-18. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9653727

Mushtaq, M. U. (2009). Public health in British India: a brief account of the histor y of medical services and disease prevention in colonial India. Indian Journal of Community Medicine: Official Publication of Indian A ssociation of Preventive & Social Medicine, 34(1), 6-14. https://doi. org /10.4103/0970-0218.45369

[125←]

‘No one is entirely sure how the disease reached Bombay in August 1896, but there is no doubt about the devastation it caused.’

Simpson, W. J. (2010). A Treatise on Plague Dealing with the Historical, Epidemiological, Clinical, Therapeutic and Preventive A spects of the Disease. Cambridge University Press. https://doi.org /10.1017/CBO9780511710773

[126←]

‘Inspired by data on the plague outbreaks in Bombay, collected while McKendrick was in India, they conducted the single-most influential study in the histor y of mathematical epidemiology.’

Kermack , W. O., & McKendrick , A . G. (1927). A contribution to the mathematical theor y of epidemics. Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 115(772), 700-721. https://doi.org /10.1098/rspa.1927.0118

[127←]

‘One study found that in the US alone over 1000 outbreaks of the vomiting bug, norovirus, were linked to contaminated food in the four years from 2009 to 2012.’

Hall, A . J., Wikswo, M. E., Pringle, K ., Gould, L. H., Parashar, U. D. (2014). Vital signs: food-borne norovirus outbreaks - United States, 2009-2012. MMWR . Morbidity and Mortality Weekly Report, 63(22), 491-5.

[128←]

‘The S-I-R model predicts that, ultimately, outbreaks die out from of a lack of infective people, not a lack of susceptibles.’

Murray, J. D. (2002). Mathematical Biology I: An Introduction. Springer.

[129←]

‘Over 60% of all cervical cancers are caused by two strains of the human papillomavirus (HPV).’

Bosch, F. X ., Manos, M. M., Muñoz, N., Sherman, M., Jansen, A . M., Peto, J.,... Shah, K . V. (1995). Prevalence of human papillomavirus in cervical cancer: a worldwide perspective. International Biological Study on Cervical Cancer (IBSCC) Study Group. Journal of the National Cancer Institute, 87(11), 796-802.

[130←]

‘Indeed, HPV is the most frequent sexually transmitted disease in the world.’

Gavillon, N., Vervaet, H., Derniaux , E., Terrosi, P., Graesslin, O., & Quereux , C. Papillomavirus humain (HPV): comment ai-je attrapé ça ? Gynécologie .(2010) Obstétrique & Fertilité, 38(3), 199-204. https://doi. org J.GYOBFE.2010.01.003/10.1016/

[131←]

’the other isotope, which makes up 99.3% of naturally occurring uranium‘

Webb, J. (2003). Are the laws of nature changing with time? Physics World, 16(4), https://doi.org /10.1088/2058-7058/16/4/38 .33-8

[132←]

Studies undertaken in the UK around the time of the vaccine’s deployment indicated‘ that the most cost-effective strategy would be to immunise adolescent girls between ’.the ages of 12 and 13, the likely future sufferers of cervical cancer

Jit, M., Choi, Y. H., & Edmunds, W. J. (2008). Economic evaluation of human papillomavirus vaccination in the United Kingdom. BMJ (Clinical Research Ed.), a769. https://doi.org /10.1136/bmj.a769 ,337

[133←]

’the other isotope, which makes up 99.3% of naturally occurring uranium‘

Webb, J. (2003). Are the laws of nature changing with time? Physics World, 16(4), https://doi.org /10.1088/2058-7058/16/4/38 .33-8

[134←]

Related studies in other countries, considering mathematical models of the‘ heterosexual transmission of the disease, confirmed that vaccinating females only ’.was the best course of action

Zechmeister, I., Blasio, B. F. de, Garnett, G., Neilson, A . R ., & Siebert, U. (2009). Cost-effectiveness analysis of human papillomavirus-vaccination programs to prevent cervical cancer in Austria. Vaccine, 27(37), 5133-41. https://doi.org J.VACCINE.2009.06.039/10.1016/

[135←]

that the strains of HPV guarded against by the vaccine can also cause a range of non-‘ ’.cervical diseases in both women and men

Kohli, M., Ferko, N., Martin, A ., Franco, E. L., Jenkins, D., Gallivan, S., . . . Drummond, M. (2007). Estimating the long-term impact of a prophylactic human

papillomavirus 16/18 vaccine on the burden of cervical cancer in the UK . British Journal of Cancer, 96(1), 143-50. https://doi. org /10.1038/sj.bjc.6603501

Kulasingam, S. L., Benard, S., Barnabas, R . V, Largeron, N., & Myers, E. R . Adding a quadrivalent human papillomavirus vaccine to the UK cervical .(2008) cancer screening programme: a cost-effectiveness analysis. Cost Effectiveness and Resource Allocation, 6(1), 4. https://doi.org /10.1186/1478-7547-6-4

Dasbach, E., Insinga, R ., & Elbasha, E. (2008). The epidemiological and economic impact of a quadrivalent human papillomavirus vaccine (6/11/16/18) in the UK . BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology, 115(8), 947-56. https://doi.org /10.1111/j.1471-0528.2008.01743.x

[136←]

As well as causing cervical cancer, HPV types 16 and 18 contribute to 50% of penile‘ ’.cancer, 80% of anal cancers, 20% of mouth, and 30% of throat cancers

Hibbitts, S. (2009). Should boys receive the human papillomavirus vaccine? Yes. BMJ, 339, b4928. https://doi.org /10.1136/BMJ.B4928

parkin, D. M., & Bray, F. (2006). Chapter 2: The burden of HPV- related cancers. Vaccine, 24, S11-S25. https://doi.org /10.1016/J. VACCINE.2006.05.111

Watson, M., Saraiya, M., Ahmed, F., Cardinez, C. J., Reichman, M. E., Weir, H. K ., Richards, T. B. (2008). Using population-based cancer registr y data to assess the & burden of human papillomavirus-associated cancers in the United States: Overview of methods. Cancer, 113(S10), 2841-54. https://doi.org /10.1002/cncr.23758

[137←]

’.In both the US and UK , the majority of cancers caused by HPV are not cervical‘

Hibbitts, S. (2009). Should boys receive the human papillomavirus vaccine? Yes. BMJ, 339, b4928. https://doi.org /10.1136/BMJ.B4928

ICO/IARC Information Centre on HPV and Cancer. (2018). United Kingdom .Human Papillomavirus and Related Cancers, Fact Sheet 2018

Watson, M., Saraiya, M., Ahmed, F., Cardinez, C. J., Reichman, M. E., Weir, H. K ., Richards, T. B. (2008). Using population-based cancer registr y data to assess the & burden of human papillomavirus-associated cancers in the United States: Overview of methods. Cancer, 113(S10), 2841-2854. https://doi.org /10.1002/cncr.23758

[138←]

’Significantly, HPV types 6 and 11 also cause nine out of ten cases of anogenital warts‘

Yanofsky, V. R ., Patel, R . V, & Goldenberg, G. (2012). Genital warts: a comprehensive review. The Journal of Clinical and Aesthetic Dermatology, 5(6), .25-36

[139←]

'In the US approximately 60% of the healthcare costs associated with all non-cervical HPV infections are spent on the treatment of these warts.'

Hu, D., & Goldie, S. (2008). The economic burden of noncervical human papillomavirus disease in the United States. American Journal of Obstetrics and Gynecology, 198(5), 500.e1-500.e7. https://doi.org /10.1016/J. AJOG.2008.03.064

[140←]

'Models based on sexual networks including homosexual relationships have a higher rate of disease transmission than those which only consider heterosexual relationships.'

Gómez-Gardeñes, J., Latora, V., Moreno, Y., & Profumo, E. (2008). Spreading of sexually transmitted diseases in heterosexual populations. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105(5), 1399-404. https://doi.org /10.1073/pnas.0707332105

[141←]

'The prevalence of HPV in men who have sex with men is significantly higher than in the general population.'

Blas, M. M., Brown, B., Menacho, L., Alva, I. E., Silva-Santisteban, A ., & Carcamo, C. (2015). HPV Prevalence in multiple anatomical sites among men who have sex with men in Peru. PLOS ONE, 10(10), e0139524. https:// doi.org journal.pone.0139524/10.1371/

McQuillan, G., Kruszon-Moran, D., Markowitz, L. E., Unger, E. R ., & Paulose-Ram, R . (2017). Prevalence of HPV in Adults aged 18-69: United States, 2011-2014. NCHS Data Brief, (280), 1-8. Retrieved from http:// www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28463105

[142←]

'In the US, the incidence rate of anal cancer in this group is over 15 times higher. At 35 per 100,000 it is comparable to the rates of cervical cancer in women before cervical screening was introduced and significantly higher than current rates of cervical cancer in the US.'

D'Souza, G., Wiley, D. J., Li, X ., Chmiel, J. S., Margolick , J. B., Cranston, R . D., Jacobson, L. P. (2008). Incidence and epidemiology of anal cancer in the & multicenter AIDS cohort study. Journal of Acquired Immune Deficiency Syndromes https://doi.org /10.1097/ QAI.0b013e31817aebfe .491-99 ,(4)48 ,(1999)

Johnson, L. G., Madeleine, M. M., Newcomer, L. M., Schwartz, S. M., & Daling, J. R . (2004). Anal cancer incidence and survival: the surveillance, epidemiology, and end results experience, 1973-2000. Cancer, 101(2), 281-8. https://doi.org cncr.20364/10.1002/

Qualters, J. R ., Lee, N. C., Smith, R . A ., & Aubert, R . E. (1987). Breast and cervical cancer surveillance, United States, 1973-1987. Morbidity and Mortality Weekly Report: Surveillance Summaries. Centers for Disease Control & Prevention .(CDC)

U.S. Cancer Statistics Working Group. U.S. Cancer Statistics Data Visualizations Tool, based on November 2017 submission data (1999-2015): U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention and .National Cancer Institute; www.cdc.gov/ cancer/dataviz, June 2018

Noone, A . M., Howlader, N., Krapcho, M., Miller, D., Brest, A ., Yu, M., Ruhl, J., Tatalovich, Z., Mariotto, A ., Lewis, D. R ., Chen, H. S., Feuer, E. J., Cronin, K . A . eds). SEER Cancer Statistics Review, 1975-2015, National Cancer Institute.) Bethesda, MD, https://seer.cancer.gov/csr/1975_2015/, External based on November .SEER data submission, posted to the SEER website, April 2018 2017

Chin-Hong, P. V., Vittinghoff, E., Cranston, R . D., Buchbinder, S., Cohen, D., Colfax , G., . . . Palefsky, J. M. (2004). Age-specific prevalence of anal human papillomavirus infection in HIV-negative sexually active men who have sex with men: The E XPLORE Study. The Journal of Infectious Diseases, 190(12), 2070-76. https://doi.org /10.1086/425906

[143←]

In July of the same year, advice based on a new cost-effectiveness study recommended' '.that all boys in the UK be given the HPV vaccination at the same age as girls

Brisson, M., Bénard, É., Drolet, M., Bogaards, J. A ., Baussano, I., Vänskä, S.,... Walsh, C. (2016). Population-level impact, herd immunity, and elimination after human papillomavirus vaccination: a systematic review and meta-analysis of predictions from transmission-dynamic models. Lancet. Public Health, 1(1), e8-e17. https://doi.org /10.1016/S2468- 2667(16)30001-9

Keeling, M. J., Broadfoot, K . A ., & Datta, S. (2017). The impact of current infection levels on the cost-benefit of vaccination. Epidemics, 21, 56-62. https://doi.org /10.1016/J.EPIDEM.2017.06.004

Joint Committee on Vaccination and Immunisation. (2018). Statement on HPV vaccination. Retrieved from https://www.gov.uk /government/ publications/jcvi-statement-extending-the-hpv-vaccination-programme- conclusions

Joint Committee on Vaccination and Immunisation. (2018). Interim statement on extending the HPV vaccination programme. Retrieved March 7, 2019, from https://www.gov.uk /government/publications/jcvi-statement- extending-the-hpv-vaccination-programme

[144←]

In particular, it does an excellent job of describing the rate at which the levels of' '.radiation emitted by a radioactive substance decrease over time

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). L XIV. The cause and nature of radioactivity. Part II. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(23), 569-85. https://doi.org /10.1080/14786440209462881

Rutherford, E., & Soddy, F. (1902). XLI. The cause and nature of radioactivity. Part I. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(21), 370-96. https://doi.org /10.1080/14786440209462856

[145←]

With that expense in mind, as well as what smacked of needlessly fraught reaction, a' team of mathematicians from the London School of Hygiene and Tropical Medicine '.developed a simple mathematical model incorporating an incubation period

Mabey, D., Flasche, S., & Edmunds, W. J. (2014). Airport screening for Ebola. BMJ Clinical Research Ed.), 349, g6202. https://doi.org /10.1136/bmj. g6202)

[146←]

In less extreme cases, simple applications of mathematical modelling are able to' '.suggest the most effective duration to isolate infected patients

Castillo-Chavez, C., Castillo-Garsow, C. W., & Yakubu, A .-A . (2003). Mathematical Models of Isolation and Quarantine. JAMA : The Journal of the American Medical A ssociation, 290(21), 2876-77. https://doi.org /10.1001/ jama.290.21.2876

[147←]

Mathematical models of disease spread have identified the degree to which the‘ effectiveness of a quarantining strategy depends on the timing of peak ’.infectiousness

Day, T., Park , A ., Madras, N., Gumel, A ., & Wu, J. (2006). When is quarantine a useful control strategy for emerging infectious diseases? American Journal of Epidemiology, 163(5), 479-85. https://doi.org/10.1093/ aje/kwj056

Peak , C. M., Childs, L. M., Grad, Y. H., & Buckee, C. O. (2017). Comparing nonpharmaceutical interventions for containing emerging epidemics. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114(15), 4023-https://doi.org /10.1073/ pnas.1616438114 .8

[148←]

In 2014, around the peak of the Ebola outbreak , a mathematical study concluded that,‘ approximately 22% of new Ebola cases were attributable to deceased Ebola ’.victims

Agusto, F. B., Teboh-Ewungkem, M. I., & Gumel, A . B. (2015). Mathematical assessment of the effect of traditional beliefs and customs on the transmission dynamics of the 2014 Ebola outbreaks. BMC Medicine, 13(1), 96. https://doi.org s12916-015-0318-3/10.1186/

[149←]

A study which modelled the spread of the 2015 Disneyland measles outbreak - in‘ which Mobius Loop was infected - suggested vaccination rates amongst those exposed to the disease may have been as low as 50% - way below the threshold ’.required for herd immunity

Majumder, M. S., Cohn, E. L., Mekaru, S. R ., Huston, J. E., & Brownstein, J. S. Substandard vaccination compliance and the 2015 measles outbreak . .(2015) JAMA Pediatrics, 169(5), 494. https://doi.org /10.1001/ jamapediatrics.2015.0384

[150←]

The fire drew into the atmosphere hundreds of times more radioactive material than‘ had been released during the bombing of Hiroshima, causing widespread ’.environmental consequences for almost all of Europe

International Atomic Energy Agency. (1996). Ten years after Chernobyl: what do we really know? In Proceedings of the IAE A / WHO/EC International Conference: One Decade after Chernobyl: Summing Up the Consequences. Vienna: International .Atomic Energy Agency

[151←]

This public health disaster was not caused by disease-ridden animals, poor sanitation or‘ even failures of government policy, but instead by a sombre five-page publication in ’.the well-respected medical journal, the Lancet

Wakefield, A ., Murch, S., Anthony, A ., Linnell, J., Casson, D., Malik , M., . . . Walker-Smith, J. (1998). RETR ACTED: Ileal-lymphoid-nodular hyperplasia, non-specific colitis, and pervasive developmental disorder in children. Lancet, https://doi.org /10.1016/S0140- 6736(97)11096-0 .637-41 ,(9103)351

[152←]

’sheep‘

Davidson, J. (1938). On the ecology of the growth of the sheep population in South .Australia. Trans. Roy. Soc. S. A ., 62(1), 11-148

Davidson, J. (1938). On the growth of the sheep population in Tasmania. Trans. .Roy. Soc. S. A ., 62(2), 342-6

[153←]

World Health Organization figures show that vaccines prevent millions of deaths ever ‘ ’.y year and could prevent millions more if we could improve global coverage

World Health Organisation: strategic advisor y group of experts on immunization. S AGE DoV GVAP A ssessment report 2018. WHO. World Health .(2018) Organization. Retrieved from https://www.who.int/ /immunization/global_vaccine_action_plan/sage_assessment_reports/en